

UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO

ESCUELA DE POSGRADO

**Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Mecánica y Eléctrica con mención
en Energía**



Tesis

**Optimización de la generación de energía en la central hidroeléctrica
a pie de presa del proyecto Chavimochic, mediante el control de los
sedimentos**

Para obtener el grado académico de:

**Doctor en Ciencias de la Ingeniería Mecánica y Eléctrica con mención en
Energía**

Autor:

Mg. Eduardo Santiago Willis Araujo

<https://orcid.org/0009-0002-6383-9076>

Asesor:

Dr. Fredy Dávila Hurtado

<https://orcid.org/0000-0001-8604-8811>

Lambayeque, 2025

Optimización de la generación de energía en la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic, mediante el control de los sedimentos



Mg. Eduardo Santiago Willis Araujo
Autor



Dr. Fredy Dávila Hurtado
Asesor

Proyecto de Tesis presentado a la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo para optar el Grado Académico de: Doctor en Ciencias de la Ingeniería Mecánica y Eléctrica con mención en Energía.

Aprobado por:



Dr. Amado Aguinaga Paz
Presidente del jurado



Dr. Daniel Carranza Montenegro
Secretario del jurado



Dr. James Skinner Zelada Padilla
Vocal del jurado

Lambayeque, 2025

Acta de sustentación (copia)

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS 113

Siendo las 10:00 am horas del día 17 de Marzo del año Dos Mil veinti y cinco, en la Sala de Sustentación de la Escuela de Posgrado de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo de Lambayeque, se reunieron los miembros del Jurado, designados mediante Resolución N° 727-2023-EPG de fecha 04-08-2023, conformado por:

Dr. AHADO AGUINAGA PAZ PRESIDENTE (A)
Dr. DANIEL CARRANZA MONTENEGRO SECRETARIO (A)
Dr. JAMES SKINNER CELADA PADILLA VOCAL
Dr. FREDY DAVILA HURTADO ASESOR (A)

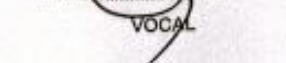
Con la finalidad de evaluar la tesis titulada OPTIMIZACION DE LA GENERACION DE ENERGIA EN LA CENTRAL HIDROELECTRICA A PIE DE PRESA DE PROYECTO CHANIMDCHIC, MEDIANTE EL CONTROL DE LOS SEDIMENTOS

presentado por el (la) Tesista EDUARDO SANTIAGO WILLIS ARAUJO
 sustentación que es autorizada mediante Resolución N° 130-2025-EPG-1 de fecha 07-03-2025

El Presidente del jurado autorizó del acto académico y después de la sustentación, los señores miembros del jurado formularon las observaciones y preguntas correspondientes, las mismas que fueron absueltas por el (la) sustentante, quien obtuvo 18 puntos que equivale al calificativo de MUY BUENO

En consecuencia el (la) sustentante queda apto (a) para obtener el Grado Académico de:
DOCTOR EN CIENCIAS DE LA INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA CON MENCIÓN EN ENERGIA

Siendo las 11:00 horas del mismo día, se da por concluido el acto académico, firmando la presente acta.


 PRESIDENTE

 VOCAL


 SECRETARIO

 ASESOR

CONSTANCIA DE VERIFICACION DE ORIGINALIDAD

Yo FREDY DAVILA HURTADO usuario revisor de Tesis ☒

Trabajo de Suficiencia Profesional ☐ y/o Trabajo Académico ☐

Titulado: Optimización de la generación de energía en la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto
Chavimochic, mediante el control de los sedimentos

Cuyo autor (es) son: Eduardo Santiago Willis Araujo; con DNI N° 16430362 y
.....; con DNI N°; declaro que la evaluación realizada por el
Programa informático, ha arrojado un porcentaje de similitud ¹⁶.....%, verificables en el Resumen del
Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito (a) analizó reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del
porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la
integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los
protocolos respectivos,

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 05 de MARZO del 2025



Dr. Fredy Davila Hurtado
DNI: 16670066
ASESOR

Defina la modalidad con (X)

Adjunta:

Resumen de Reporte automatizado de similitudes

Recibo digital

"OPTIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA A PIE DE PRESA DEL PROYECTO CHAVIMOCHIC, MEDIANTE EL CONTROL DE LOS SEDIMENTOS

INFORME DE ORIGINALIDAD

16%	16%	4%	5%
INDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	vsip.info Fuente de Internet	3%
2	documents.mx Fuente de Internet	2%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
4	repositorio.unprg.edu.pe Fuente de Internet	1%
5	bibliotecadigital.ciren.cl Fuente de Internet	1%
6	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Trabajo del estudiante	1%
7	idoc.pub Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.upao.edu.pe Fuente de Internet	<1%


 Dr. Fredy Dávila Hurtado
 DNI: 16670066
 ASESOR



Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Eduardo Willis Araujo
 Título del ejercicio: Quick Submit
 Título de la entrega: *OPTIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN LA CENT...
 Nombre del archivo: 03.03.2025_TESIS_DOCTORADO.pdf
 Tamaño del archivo: 6.78M
 Total páginas: 186
 Total de palabras: 38,322
 Total de caracteres: 179,200
 Fecha de entrega: 05-mar.-2025 06:32p. m. (UTC-0500)
 Identificador de la entrega: 2606418289




UNIVERSIDAD NACIONAL
 "PEDRO RUIZ GALLO"
 ESCUELA DE POSTGRADO

DOCTORADO EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y
 ELÉCTRICA, CON MENCIÓN EN ENERGÍA

OPTIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN LA CENTRAL
 HIDROELÉCTRICA A PIR DE PRESA DEL PROYECTO CHAYMOCHIC,
 MEDIANTE EL CONTROL DE LOS SEDIMENTOS

TESIS

Presentada para optar el grado académico de Doctor en Ciencias
 de la Ingeniería Mecánica y Eléctrica con mención en Energía

Autor:
 M.Sc. Willis Araujo, Eduardo Santiago

Asesor:
 Dr. Dávila Hurtado, Fredy

LIMBAYQUE - PIRU
 2025


 Dr. Fredy Dávila Hurtado
 DNI: 16670066
 ASESOR

Dedicatoria

A Dios por haberme guiado en el camino del estudio, de la disciplina y del esfuerzo, proporcionándome la fortaleza necesaria para cumplir con mis objetivos.

A mí querida esposa María y a mis hijos Jessica Lorena del Pilar; Eduardo Daniel y Claudia Ingrid Luciana, por su comprensión, por su constante apoyo y por sus muestras de amor y cariño.

Este trabajo se lo dedico de manera muy especial a una niña, Genesis Briana Larios Willis, mi querida nieta nacida el 16 de noviembre de 2021, quien ha venido a traernos alegría a nuestro hogar.

A mi querida madre, a la memoria de mi padre y a mis hermanos.

Agradecimientos

A mi asesor, Dr. Fredy Dávila Hurtado por su apoyo constante.

A la plana directiva de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica de La Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo”, quienes en su momento gestionaron ante la Escuela de Post Grado de la Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo” la implementación de los estudios de Doctorado en Ingeniería Mecánica Eléctrica – Energía.

A la Escuela de Post Grado de la Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo” por haberme permitido realizar este curso de Doctorado.

A los profesionales que con sus aportes han contribuido en la elaboración de este trabajo de investigación, tal es el caso del ingeniero químico Antonio Portilla Guarniz, ex trabajador del Proyecto Especial Chavimochic y consultor independiente, especialista en estudios de sedimentación.

Al jurado, quienes han posibilitado consolidar esta tesis.

Índice General

Acta de sustentación (copia).....	iii
Dedicatoria.....	vii
Agradecimientos.....	viii
Índice General	ix
Índice de Tablas.....	xii
Índice de Figuras	xiv
RESUMEN.....	xvi
ABSTRACT.....	xvii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I: DISEÑO TEÓRICO	3
1.1 Antecedentes de la Investigación	3
1.1.1 UNESCO.....	5
1.1.2 Polanco, J.A, Ramirez-Atehortúa, F.H, Montes-Gomez, F.M, Botero-Hernández, B.A, Barco, M.O,..	6
1.1.3 Becerra, G.M.....	7
1.1.4 Calle-Velasco	8
1.1.5 Proyecto Especial Chavimochic.....	9
1.2 Base Teórica.....	12
1.2.1 Fundamentación teórica del cálculo de Potencia y Energía medias	17
1.2.2 Fundamentación Teórica del análisis hidrológico	18
1.2.3 Fundamentación Teórica de los Sedimentos	19
1.2.4 Fundamentación Teórica de la regulación de embalses	24
1.2.5 Fundamentación teórica del análisis hidráulico	26
1.2.6 Fundamentación teórica de la determinación de la demanda hídrica	31
1.3 Definiciones Conceptuales.....	32
1.3.1 Potencia Nominal.....	32
1.3.2 Potencia Efectiva.....	32
1.3.3 Potencia Garantizada.....	32
1.3.4 Energía Hidroeléctrica Generada en una central a pie de presa	32
1.3.5 Central Hidroeléctrica a pie de presa	32

1.3.6	Embalse hidráulico.....	32
1.3.7	Presa.....	33
1.3.8	Sala de máquinas.....	33
1.3.9	Turbina hidroeléctrica.....	33
1.3.10	Definición y objetivo de la Hidrología.....	33
1.3.11	Coagulación.....	35
1.3.12	Floculación.....	35
1.3.13	Sedimentación.....	36
1.4	Operacionalización de variables.....	36
1.5	Hipótesis.....	38
1.5.1	Estructura de la hipótesis.....	38
CAPITULO II: METODOS Y MATERIALES		41
2.1	Tipo de Investigación.....	42
2.2	Método de Investigación.....	42
2.3	Diseño de Contrastación.....	43
2.4	Población, Muestra y Muestreo.....	43
2.5	Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales de Recolección de Datos.....	44
2.5.1	La técnica de recolección de datos	44
2.5.2	Los instrumentos utilizados para la recolección de datos.....	44
2.5.3	Los equipos utilizados para la recolección de datos.....	44
2.5.4	Materiales de recolección de datos.....	47
2.6	Procesamiento y Análisis de Datos	47
2.6.1	Consideraciones generales	47
2.6.2	Recursos utilizados para el tratamiento de las muestras.....	48
2.6.3	Procesamiento y análisis de datos propiamente dichos	50
CAPITULO III: RESULTADOS		54
3.1	Del Estudio Hidrológico.....	55
3.1.1	Oferta hídrica del río Santa	56
3.1.2	Cálculo de las persistencias de caudales de las aguas derivables al proyecto Chavimochic	61
3.2	Estudio Sedimentológico.....	64
3.2.1	Premisas para realizar el estudio sedimentológico	64
3.2.2	Resultados del estudio de sedimentación sin floculantes (Primer escenario).....	65

3.2.3	Resultados del estudio de sedimentación con floculantes (Segundo escenario)	68
3.2.4	Cálculo de la función de la velocidad de sedimentación con floculantes.....	68
3.3	Estudio de Regulación del embalse.....	72
3.4	Estudio hidráulico	73
3.4.1	Perdidas por fricción	75
3.4.2	Perdidas singulares.....	76
3.5	Estudio de la potencia media de la Central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic ..	76
3.6	Cálculo de la energía generada optimizada durante la operación de la central hidroeléctrica a pie de presa	79
3.6.1	Cálculo del volumen de sedimentos para diferentes años de operación, considerando los dos escenarios anteriormente indicados.....	80
3.6.2	Cálculo de la energía generada para diferentes años de operación, empleando la correspondiente pérdida de volumen útil del embalse debido a los sedimentos.....	81
CAPITULO IV: DISCUSIÓN.....		88
CAPITULO V: CONCLUSIONES		90
CAPITULO VI: RECOMENDACIONES		92
Referencias Bibliográficas.....		93
ANEXOS		97
ANEXO 1		97
ANEXO 2		100

Índice de Tablas

Tabla 1: Clasificación de embalses	22
Tabla 2: Peso unitario inicial.....	23
Tabla 3: Valores de K.....	24
Tabla 4: Operacionalización de variables.....	37
Tabla 5: Descargas Medias Mensuales del río Santa (m^3/s).....	58
Tabla 6: Descargas Medias Mensuales del río Santa para el proyecto Chavimochic con restricción de caudales de $45 \text{ m}^3/\text{s}$. (m^3/s).....	59
Tabla 7: Descargas Medias Mensuales del río Santa para el proyecto Chavimochic con restricción de caudales de $45 \text{ m}^3/\text{s}$ y la restricción de caudales de $88.0 \text{ m}^3/\text{s}$	60
Tabla 8: Cuadro de persistencias considerando las descargas Medias Mensuales del río Santa para el proyecto Chavimochic con restricción de caudales de $45 \text{ m}^3/\text{s}$ y la restricción de caudales de $88.0 \text{ m}^3/\text{s}$. (m^3/s)	62
Tabla 9: Cuadro de persistencias al 50%.....	63
Tabla 10: Volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador; densidad del material y años de operación del embalse.	66
Tabla 11: Volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador al 85%, 90% y 95%; densidad del material y años de operación del embalse	68
Tabla 12: Volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador; densidad del material y años de operación del embalse.	69
Tabla 13: Volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador al 85%, 90% y 95%; densidad del material y años de operación del embalse	71
Tabla 14: Cuadro de regulación del embalse al 50% de persistencia y al inicio de operación.....	73
Tabla 15: Cuadro de valores k.....	76
Tabla 16: Cuadro de volumen de sedimentos para el escenario donde se emplea polímeros.	80
Tabla 17: Cuadro de volumen de sedimentos para el escenario donde no se emplea polímeros.	81
Tabla 18: Cuadro de regulación del embalse para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación con floculantes.....	83
Tabla 19: Cuadro del cálculo de la altura del embalse en su centro de gravedad para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación con floculantes.....	83

Tabla 20: Cuadro de cálculo del nuevo volumen útil del embalse, descontando sedimentos para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación con floculantes	83
Tabla 21: Cuadro de cálculo de la energía mensual generada, considerando el nuevo volumen útil del embalse, descontando sedimentos para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación con floculantes	84
Tabla 22: Cuadro de regulación del embalse para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación sin floculantes	84
Tabla 23: Cuadro del cálculo de la altura del embalse en su centro de gravedad para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación sin floculantes	85
Tabla 24: Cuadro de cálculo del nuevo volumen útil del embalse, descontando sedimentos para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación sin floculantes	85
Tabla 25: Cuadro de cálculo de la energía mensual generada, considerando el nuevo volumen útil del embalse, descontando sedimentos para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación sin floculantes	85
Tabla 26: Cuadro resumen con los valores de energía generada anual para diferentes años de operación de la central hidroeléctrica, empleando floculadores	86
Tabla 27: Cuadro resumen con los valores de energía generada anual para diferentes años de operación de la central hidroeléctrica, sin floculadores	86
Tabla 28: Cuadro resumen con el cálculo de la energía optimizada en el periodo de operación de la central hidroeléctrica a pie de presa.	87

Índice de Figuras

Figura 1: Esquema del Marco Teórico	13
Figura 2: Concepción General del proyecto	16
Figura 3: Simulación de la operación de una central hidroeléctrica con embalse	25
Figura 4: esquemas comparativos entre flujos en tubería y en canal abierto	27
Figura 5: Ecuación de la Continuidad	28
Figura 6: Ecuación de la Energía.....	29
Figura 7: Flujo de trabajo para el desarrollo de la investigación.	41
Figura 8: Ejemplo de medición de sedimentos en ingreso al desarenador	45
Figura 9: Ejemplo de medición de sedimentos a la salida del desarenador	45
Figura 10: Etapas de muestreo y sonda clapé.....	46
Figura 11: Visita en el laboratorio de suelos del Proyecto Especial Chavimochic.....	49
Figura 12: Visita en el laboratorio de suelos del Proyecto Especial Chavimochic.....	49
Figura 13: Visita en el laboratorio de suelos del Proyecto Especial Chavimochic.....	50
Figura 14: Triángulo textural.....	52
Figura 15: Esquema de obras del proyecto Chavimochic, considerando las tres etapas.	55
Figura 16: Descargas promedios del río Santa.	58
Figura 17: Descargas promedios del río Santa, con restricciones de 45 m ³ /s.....	59
Figura 18: Descargas promedios del río Santa, con restricciones de 45 m ³ /s y 88 m ³ /s.....	60
Figura 19: Caudales del río Santa, con restricciones de caudales de 45 m ³ /s y de 88 m ³ /s, así como para una persistencia del 50% de caudales.....	63
Figura 20: Curva de densidad del sedimento. Periodo (0 – 100) años – Sin aditivo	65
Figura 21: Lamina donde se muestra el volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador; densidad del material y años de operación del embalse.	67
Figura 22: Curva de densidad del sedimento. Periodo (0 – 100) años – Con aditivo.....	69
Figura 23: Figura donde se muestra el volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador; densidad del material y años de operación del embalse.	71
Figura 24: Corte longitudinal del embalse cota NAMO y túnel de toma	74
Figura 25: Corte longitudinal de la casa de máquinas. Eje de turbinas	74
Figura 26: Curva del embalse. Altura vs almacenamiento	78

Figura 27: Corte longitudinal del embalse cota NAMO y túnel de toma	78
Figura 28: Corte longitudinal de la casa de máquinas. Eje de turbinas	79

RESUMEN

Esta tesis presenta una metodología para determinar la óptima producción hidroenergética de una Central Hidroeléctrica a Pie de Presa, que permita definir adecuadamente la oferta hidroeléctrica al SEIN, favorables para el sistema en términos técnicos y económicos, sin prescindir de los aspectos sociales, culturales y ecológicos.

Esta metodología toma en consideración que la disponibilidad del agua almacenada en una presa de embalse para la generación hidroeléctrica privilegia el empleo del agua para la satisfacción de la demanda poblacional y agrícola. En este contexto la producción hidroenergética debe adecuarse a los planes de suministro poblacionales y al plan de riego anual, los cuales deben ser incluidos con esa prioridad en el balance hídrico del sistema hidro agro energético; en otras palabras, esta tesis estudia, y presenta una metodología para la optimización de la potencia media y de la producción hidroenergética de una central hidroeléctrica a pie de presa, que sea técnica y económicamente viable y que fundamentalmente tenga un equilibrio técnico con la prioridad de atender el uso poblacional y un plan de riego anual de un área agrícola.

Esta tesis se fundamenta teóricamente en el análisis hidrológico, el estudio sedimentológico, el estudio del balance hídrico, la regulación de embalses, el análisis hidráulico y el cálculo de potencia y energía.

Palabras claves

Centrales hidroeléctricas de pie de presa, Generación hidroeléctrica, Regulación de embalses, Presas de embalse, Optimización, Potencia media, Energía generada.

ABSTRACT

This thesis presents a methodology to determine the optimal hydropower production of a Hydroenergetic production power station of foot of Dam, to adequately define the hydroelectric supply to SEIN, favorable for the system in technical and economic terms, without sacrificing the aspects social, cultural and ecological.

This methodology takes into consideration that the availability of stored water in a reservoir for hydroelectric generation favors the use of water to satisfy domestic and agricultural demand. In this context, hydroelectric production must adapt to water supply plans for the population and the annual irrigation plan, which must be included with that priority in the water balance of the hydro-agro-energy system. In other words, this thesis studies and presents a methodology to determine the hydroelectric production of a dam-toe hydroelectric plant that is technically and economically viable and fundamentally maintains a technical balance with the priority of meeting population needs and an annual irrigation plan for an agricultural area.

This thesis is theoretically grounded in hydrological analysis, sedimentological study, water balance study, reservoir regulation, hydraulic analysis, and the calculation of power and energy.

Key words

Dam-toe hydroelectric power plants, Hydroelectric generation, Reservoir regulation, Storage dams, Optimization, Average power, Generated energy.

INTRODUCCIÓN

La optimización desarrollada en la presente tesis se realiza en el ámbito del Proyecto Chavimochic y específicamente en la central hidroeléctrica a pie de presa.

Esta investigación resalta la importancia de optimizar la generación de energía hidroeléctrica en un proyecto, a través de diferentes procedimientos para evitar la colmatación del embalse, siendo uno de ellos el referido al empleo de polímeros.

Hay que mencionar que la construcción de centrales hidroeléctricas en el país se ejecuta de manera esporádica, por lo que es aconsejable el cuidado que se debe tener en la operación de estas estructuras, de tal forma que permitan optimizar la generación de energía. Asimismo, tratándose de obras nuevas, es importante la concepción o configuración de las diversas estructuras civiles y el empleo de métodos de tratamiento del agua, que posibiliten lograr tal optimización.

La diversa literatura presentada en el desarrollo del presente trabajo, coinciden en que la colmatación de los embalses mediante la acumulación de sedimentos que fluyen en los cursos de agua ocasiona la pérdida de generación hidroenergética lo que a su vez es determinante para la obsolescencia de estas unidades de generación.

Entonces, nos encontramos en una situación tal, que por un lado por diferentes motivos se construyen muy pocas centrales hidroeléctricas, y, por otro lado, estas unidades de generación van perdiendo su capacidad. En este contexto, dicha situación determina que la matriz energética en este país cada día, está fuertemente impactada por energía no renovable, con los consiguientes problemas ambientales y sociales, entre otros.

CAPITULO I: DISEÑO TEÓRICO

OPTIMIZACIÓN DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN LA CENTRAL HIDROELÉCTRICA A PIE DE PRESA DEL PROYECTO CHAVIMOCHIC, MEDIANTE EL CONTROL DE LOS SEDIMENTOS

CAPITULO I: DISEÑO TEÓRICO

1.1 Antecedentes de la Investigación

A nivel mundial, la generación de electricidad mediante centrales hidroeléctricas que cuentan con un sistema de regulación mediante embalses y presas, con el paso de los años, ven afectados su producción de energía, debido a la disminución del volumen útil del embalse por efecto del arrastre y depósito de sedimentos en el lecho del embalse: “¿Cuál es la gestión utilizada para la sedimentación en los embalses? Una revisión bibliográfica”, donde también se indican varias alternativas para eliminar o mitigar el impacto de los sedimentos en el volumen útil del embalse, alternativas que son costosas y que deberían minimizarse, en lo posible. (Arias, J.M, Llanes, E.A. 2021). (El subrayado es del autor).

En la publicación de la Organización de Naciones Unidas “Perspectivas de la gestión actual de sedimentos en nueve países de las Américas”, los países de Argentina, Brasil, Chile, Costa Rica, Cuba, México, Perú, Uruguay y Estados Unidos; muestran la problemática que afrontan en relación a los sedimentos y señalan de los pocos avances que tienen en el manejo de los mismos. (O.N.U., 2021).

A nivel de Latinoamérica, en la publicación de Becerra “Plan para el adecuado manejo de sedimentos, que permite incrementar la vida útil del embalse La Esmeralda”, señaló que al problema de la sedimentación en los embalses no se le había dado la debida importancia, sin embargo, en los últimos años se vienen realizando muchos esfuerzos para solucionar este tema, ya que tiene gran incidencia en:

- a) La disminución del volumen útil del embalse y con ello la disminución de la generación de energía, y de ser el caso, la disminución de las áreas a irrigar.

- b) La obstrucción de los conductos de toma.
- c) El desgaste de los sistemas de generación,

(Becerra, 2018). (El subrayado es del autor)

El impacto de la sedimentación en la reducción de la vida útil de embalses y el valor de las centrales hidroeléctricas es abordado en la publicación “Incidencia de la decisión de manejo de sedimentos en el valor de una central hidroeléctrica”. (Polanco, J.A, Ramirez-Atehortúa, F.H, Montes-Gomez, F.M, Botero-Hernández, B.A, Barco, M.O. et ál., 2020). (El subrayado es del autor).

En la publicación del Ministerio de Energía de Chile “Sedimentos, Hidráulica y Efectos Morfológicos”, se indica: “Las represas y reservorios tienen cierta influencia en los sistemas fluviales. Uno de los principales impactos en los reservorios es la sedimentación de los embalses. Hoy en día los sedimentos atrapados por los reservorios son de importancia mundial, ya que tiene consecuencias significativas sobre la morfología fluvial y la sustentabilidad de los 8 reservorios (Wang y Kondolf, 2014). Sumi et al. (2004) estimaron que, debido a sedimentación, se perderían la mitad de la capacidad global de almacenamiento en reservorios (ignorando los nuevos reservorios creados) para el año 2100. Annandale (2013) estimó que el almacenamiento mundial de agua en reservorios llegó a su máximo en 1995 con 4200 km³ almacenados, y ahora estaría declinando porque la tasa de sedimentación estaría excediendo la tasa de nuevas construcciones.”. (Ministerio de Energía de Chile, 2016).

El Perú no está exento de esta problemática, la colmatación de los grandes reservorios origina una serie de problemas, relacionados con la disminución de su volumen útil, en este contexto el reservorio de Poechos, está actualmente al 44,91 % de su capacidad, es decir 397,5 MMC; lo que afecta: a) La irrigación de 108,000 hectáreas, b) la generación de energía de las Centrales hidroeléctricas a pie de presa Poechos I y Poechos II, c) El control de la avenida histórica de 5,400 m³/s. Esta problemática es estudiada en la Tesis “Estudio de las técnicas de descolmatación de embalses” (Calle-Velasco, S, et ál., 2018).

En la tesis de (Vásquez, M.P, Arriola, G.G, et ál 2016) “Solución al problema de sedimentación de la represa Gallito Ciego”, se indicó que, respecto del año 1991, debido a la colmatación, el embalse de Gallito Ciego disminuyó su volumen útil en 104.56 MMC; lo que impacta en forma negativa en la generación de energía y la disminución de áreas de cultivo. (El subrayado es del autor)

En el caso de las centrales hidroeléctricas a pie de presa, hay un fuerte impacto de los sedimentos en la producción de energía, en este contexto, si no se toman previamente las soluciones para disminuir el riesgo del transporte de sedimentos y la reducción de su volumen útil. Específicamente, este es el caso de la central hidroeléctrica a pie de la presa “Palo Redondo”, que forma parte de las obras de la tercera etapa del Proyecto Chavimochic.

Aunque existen varios casos en el Perú, donde el impacto de los sedimentos influye en la generación de la energía hidroeléctrica a lo largo de la vida útil de las obras; el propósito de la presente investigación es la de plantear una alternativa que permita la optimización de la energía en la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic.

En este contexto se presentan los siguientes antecedentes:

1.1.1 UNESCO

La UNESCO y el Programa Hidrológico Intergubernamental, con el propósito de motivar a los países de las Américas a continuar realizando esfuerzos para gestionar adecuadamente los sedimentos, realizó en nueve (09) países: Argentina, Brasil, Chile, Costa Rica, Cuba, México, Perú y Uruguay, el estudio “Perspectivas de la gestión actual de sedimentos en nueve países de las Américas” (UNESCO, 2021). Este estudio, indicó lo siguiente:

“Algunas de las formas en las que los sedimentos interfieren con la estructura, involucran, por ejemplo, la capacidad de generar energía de forma eficiente, debido a que la sedimentación acumulada en represas puede reducir la vida útil de embalses hidroeléctricos. En el caso de las presas de contención, se afecta la cantidad de agua

disponible para provisión de agua potable, para riego o recreación. (...). (El subrayado es del autor).

“Esta publicación presenta los esfuerzos de países de la región para monitorear los procesos erosivos, mitigar sus efectos, contar con regulaciones y normativas adecuadas y brindar usos productivos a los sedimentos generados. Todos ellos recalcan la importancia de la investigación en esta temática, a fin de aumentar el conocimiento tanto del proceso como de las medidas que permitan gestionar de manera adecuada los sedimentos, en función a las características de cada país.”

“La sedimentación de los embalses también es un tema importante en muchas partes del mundo, incluyendo América Latina y El Caribe. Los embalses creados con el uso de grandes recursos financieros pierden cada año en volumen de almacenamiento, disminuyendo su vida útil y, como consecuencia, muchos embalses tienen solo unos pocos años de vida por delante, lo que se traduce en grandes inversiones en el mediano plazo. En casos extremos, habrá que construir nuevos embalses para satisfacer la creciente demanda de electricidad o de sistemas de riego, por ejemplo”. (El subrayado es del autor).

“La problemática de los sedimentos es poco conocida por la población global y también por los tomadores de decisiones. Ello se demuestra en que no existe mayor conciencia acerca de la importancia de los procesos de erosión y los sedimentos, y sus impactos sobre el ambiente físico y humano. (...)”

1.1.2 Polanco, J.A, Ramirez-Atehortúa, F.H, Montes-Gomez, F.M, Botero-Hernández, B.A, Barco, M.O,

Para Polanco, J.A, Ramirez-Atehortúa, F.H, Montes-Gomez, F.M, Botero-Hernández, B.A, Barco, M.O, los efectos de la sedimentación en el lecho de los embalses reducen la vida útil de los mismos y reducen el valor de las centrales hidroeléctricas, conforme a su publicación: “Incidencia de la decisión de manejo de sedimentos en el valor de una central hidroeléctrica”; que indica lo siguiente:

“La Agencia Internacional de Energía - IEA [1] predice que el 60% de todas las nuevas inversiones en energía en los próximos 20 años serán en energías

renovables. La predicción para la nueva producción de energía hidroeléctrica es del 25% de todas las nuevas energías renovables, principalmente debido al potencial en China, África, América Latina y el sudeste asiático. (Polanco, Ramirez – Atehortúa, Montes-Gomez, Botero-Hernández, Barco; 2020)

Hauer et al. [2] estipulan que uno de los principales desafíos económicos, técnicos y ecológicos de la gestión de la energía hidroeléctrica es la deposición y el tratamiento de sedimentos en las cuencas, los cuales generan la disminución del volumen de almacenamiento y la pérdida de producción de energía.

Sumi et al. [3] sostienen que en el año 2004 la capacidad bruta de almacenamiento en el mundo era de 6000 km³ con 45000 represas grandes. Sin embargo, la tasa de sedimentación anual al mismo tiempo fue de aproximadamente 31 km³ por año. Actualmente, los embalses del mundo están perdiendo capacidad a una tasa de 0.5 a 1% por año debido a los procesos de sedimentación [4]. Por lo tanto, si los sedimentos no son manejados, la capacidad total de almacenamiento se reduciría incluso a menos de la mitad para el año 2100 [3].

Los procesos de sedimentación conllevarían a la pérdida de la vida útil de los embalses y a la disminución del valor de las empresas de energía [4]. Los daños debidos a la falta de manejo de sedimentos podrían representar más del 70% del costo de construcción del embalse [5], lo cual sería también un costo para las generaciones futuras [6].

Es por eso por lo que la sostenibilidad del negocio de generación de energía hidroeléctrica depende de la implementación de alternativas de gestión de sedimentos [7,8].”. (El subrayado es del autor).

1.1.3 Becerra, G.M

Para Becerra, G.M, en su publicación “Plan para el adecuado manejo de sedimentos, que permite incrementar la vida útil del embalse Esmeralda”, pone especial énfasis en la importancia de gestionar adecuadamente los embalses asociados a centrales hidroeléctricas en el mundo, e indica lo siguiente:

“La acumulación de sedimentos en los embalses es una de las problemáticas que más aquejan a las centrales hidroeléctricas. Los sedimentos transportados pueden llegar a obstruir las bocas de toma en las presas y generar efectos abrasivos en las turbinas de generación, en sus componentes de operación y en las estructuras de concreto (Becerra, Alarcón, Salvatierra, & Fuquen, 2015). En foros e investigaciones académicas recientes, se ha resaltado la gestión de sedimentos como el reto inmediato a ser enfrentado por los generadores de energía alrededor del mundo (...).”

“(...) Aplicando el Plan de Manejo de Sedimentos – PMS se permitirá extender la vida útil del proyecto como mínimo otros 50 años (...).”

“(...) estos sedimentos ponen en riesgo las operaciones de generación hidroeléctrica bajo operaciones óptimas por diversas razones entre las que se pueden enumerar las siguientes (Sanchez & Fuquen, 2013):

- Desgaste abrasivo de los sistemas de generación (turbinas, boquillas, agujas, etc) debida a la carga sedimentaria de los afluentes que ingresan a la presa para su operación.
- Obstrucción parcial o total de las bocatomas recolectoras de afluentes por arenas y sedimentos.
- Disminución en la capacidad de almacenamiento de recurso hídrico en el embalse por acumulación de sedimentos en el fondo del reservorio”.

1.1.4 Calle-Velasco

Para Calle-Velasco, S.I, en su tesis “Estudio de las técnicas de descolmatación de embalses”, resalta la importancia de resolver el problema de la sedimentación de los embalses, ya que estas estructuras con el paso de los años van perdiendo volumen útil y con ello se afecta la economía de una determinada región; e indica lo siguiente:

“La colmatación o sedimentación de embalses es un problema que se ha vuelto recurrente en muchos embalses alrededor del mundo. Los registros de medición

muestran que la pérdida anual de capacidad de almacenamiento es de 1 % (Rocha, 2006) en los embalses debido a los sedimentos. Esta cifra puede variar dependiendo de las características propias del embalse. (...)”.

“Nuestra región no está excluida de este problema, se ve latente en el embalse Poechos. Según los registros de mediciones de la batimetría del embalse, su razón de pérdida anual de capacidad se encuentra en el orden del 1 %, sin embargo, eventos extremos como el fenómeno de El Niño incrementaron estos valores. Actualmente el reservorio se encuentra al 44,91 % de su capacidad, es decir 397,5 MMC”.

“Tal como ocurre con el embalse Poechos, muchas actividades económicas en varios países del mundo también dependen de los embalses, por lo tanto, si se resuelve el problema de colmatación de embalses, se estaría evitando que estas actividades se vean afectadas”.

“Con la finalidad de resolver el problema de la colmatación de embalses el Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria (IHHS) de la Universidad de Piura se encuentra investigando la manera de cómo lograr un diseño óptimo de embalses, para evitar este problema, y así poder lograr que el embalse cumpla la vida útil para el cual fue diseñado, sin sufrir problemas de colmatación”. (Calle Velasco, 2018).

1.1.5 Proyecto Especial Chavimochic

El Proyecto Especial Chavimochic, en su estudio “Anexo 04: Transporte de sólidos. Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa del Proyecto Chavimochic”, presenta el siguiente contenido:

1. Análisis de los estudios realizados: i) Estudio de CORPEI 1983; ii) Estudio Consorcio CHIMU – 1990; iii) Control del material sólido en el sistema de aprovechamiento del P.E. CHAVIMOCHIC, Dr. Arturo Rocha, 1999; iv) Estudio geoquímico de las aguas del río Santa y de los suelos de las irrigaciones Chavimochic y Chincas, Ministerio de Energía y Minas – INGENET Dirección General de Geotécnica, 2000; v) Plan de gestión de la oferta de agua en la cuenca de gestión Santa- Aspectos ambientales, erosión

y sedimentación de la cuenca – ATA, 2002; vi) Estudio de sedimentos en el río Santa y del sistema de conducción y distribución Chavimochic – Ing. Huber Vergara Díaz, 2005; vii) Informe de la especialidad de transporte de sedimentos – Remodelación de la bocatoma 412 msnm P.E. Chavimochic – Ing. Alfredo Mansen, 2009.

2. Características de la Cuenca Santa y Subcuenca de Tablachaca
3. Infraestructuras de Captación del Proyecto Especial Chavimochic
4. Laboratorio Sedimentológico
5. Características de los Sólidos en Suspensión
6. Relación de Caudales y Sedimentos en Suspensión – Estación Condorcerro
7. Funcionamiento de la Presa Palo Redondo
8. Determinación del Volumen Muerto de la Presa Palo Redondo

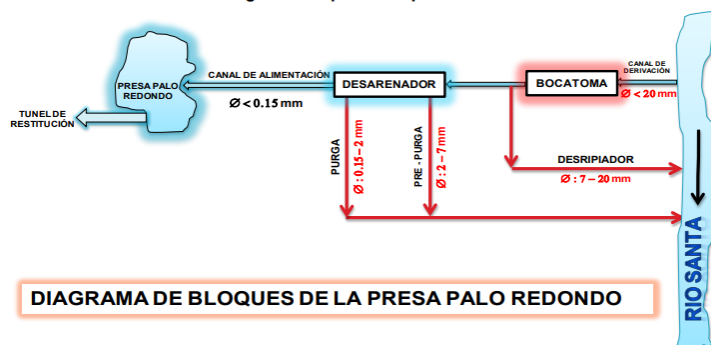
En el numeral 1.0 Introducción se indica lo siguiente:

“El presente estudio de transporte de sólidos por el río Santa para el Proyecto Chavimochic, tiene como objetivo el de analizar uno de los principales problemas que afectan a las presas, el que consiste en estimar la pérdida de capacidad de almacenamiento debido al depósito de sedimentos en su interior en un periodo de tiempo, antes que el sedimento interfiera con la utilidad de la presa; independientemente del diseño de la presa.”.

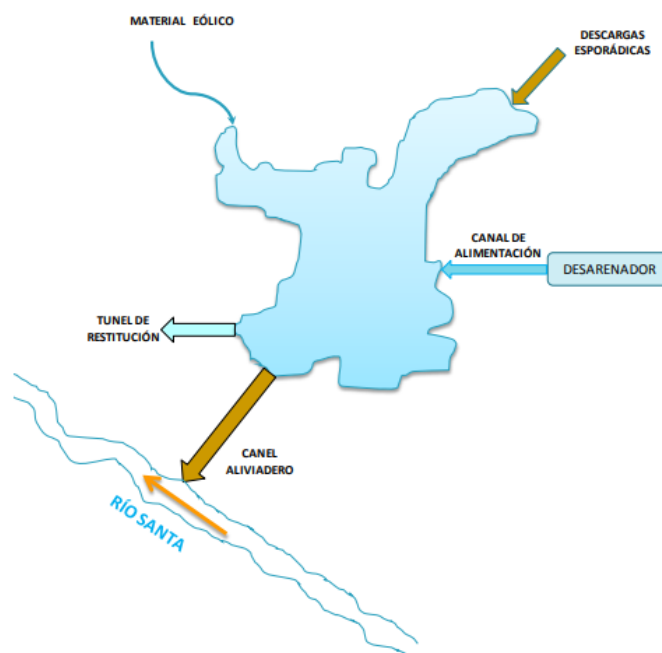
En el numeral 9.2 conclusiones, textualmente se indica lo siguiente

“Para el caso de la Presa Palo Redondo son varios los factores que intervienen en la determinación del Volumen Muerto de la presa, todos giran en torno a una idea principal, estar al tanto cuál es la cantidad de sedimentos en suspensión que traerá el canal de alimentación en los años futuros y calcular el porcentaje de sólidos retenido en la presa. A continuación, se describe el sistema de la presa Palo Redondo en un diagrama de bloques, como se describe en la Fig. 6”.

Figura N° 06
Diagrama bloques de la presa Palo redondo



“Como se describe en la Figura 7, se considera a la presa Palo Redondo como un sistema, donde la sumatoria de sólidos en suspensión que ingresan al vaso menos los sólidos que salen de la presa constituyen básicamente el peso total de sólidos depositados en la presa, este peso se va dividir con su peso específico para determinar el Volumen Muerto durante 50 años según su tiempo de vida estimado. Igualmente se adjunta grafica donde se determina las Curvas altura – volumen – área del embalse Palor redondo, según eje estudiado por G&M.”



En el numeral 10.1 conclusiones, se indica lo siguiente

“El transporte de sedimentos en la quebrada Palo Redondo se ha determinado en 5.90 MMC, cifra conservadora; calculo determinado en los estudios de Factibilidad del Embalse Palo Redondo – Volumen II (Hidrología y Sedimentos).”

“Si consideramos un periodo de vida de la presa Palo Redondo de 50 años, se tiene volumen muerto de 37.05 MMC, sin aplicar polímeros en el desarenador (considerando una eficiencia de retención del 75% de la presa).”

“En el caso que se dosifique con polímero aniónico en la entrada del desarenador se ha estimado para 50 años de vida de la Presa un volumen muerto de 27.09 MMC.”. (Proyecto Chavimochic, 2013).

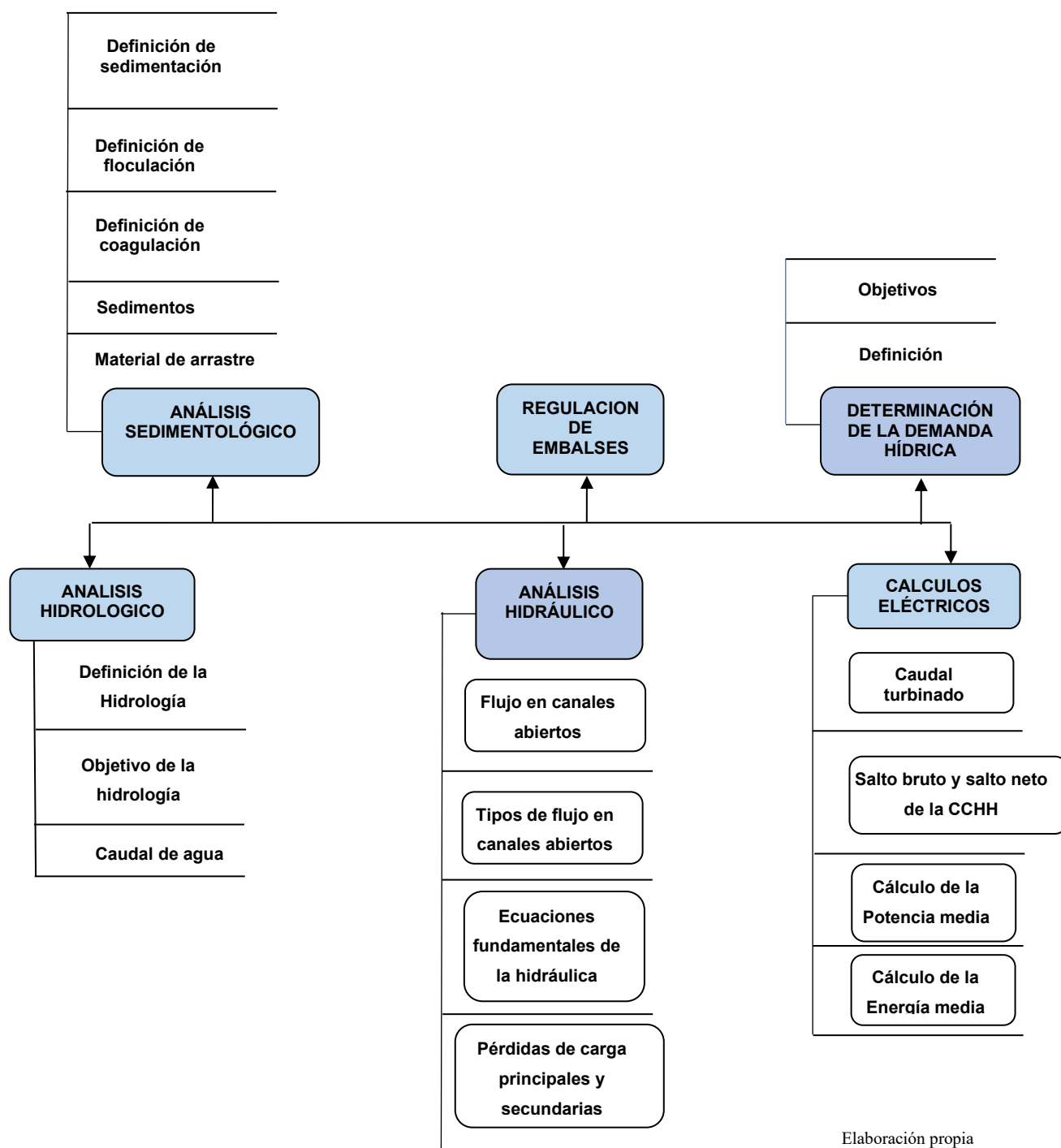
1.2 Base Teórica

La base teórica del presente estudio es el conjunto de principios teóricos que guían la investigación estableciendo unidades relevantes para el problema a investigar, y que se circunscribe a:

- a) Dimensionamiento de la Central hidroeléctrica a pie de presa.
- b) Determinación de la Potencia media de la central hidroeléctrica a pie de presa y el cálculo de la Energía Generada
- c) Análisis Hidrológico
- d) Análisis sedimentológico
- e) Análisis hidráulico (cálculo de las pérdidas de carga)
- f) Regulación de embalses

En la figura 1 se presenta el “Esquema de la base Teórica” en donde se pueden apreciar los diversos temas que lo integran.

Figura 1: Esquema del Marco Teórico



La importancia de exponer sobre el fundamento teórico del Análisis Hidrológico es el de determinar correctamente la oferta hídrica de la cuenca del río Santa, utilizando los métodos más adecuados.

La oferta hídrica, es el elemento principal de un proyecto agro hidro energético, que está relacionado con el caudal que fluye por el cauce del río Santa, el cuál en cierta forma está relacionado con el ciclo hidrológico del agua e influenciado por el arrastre de sólidos y el transporte de sedimentos. La oferta hídrica influye en el dimensionamiento de las estructuras civiles, el dimensionamiento del volumen útil y muerto del embalse de la presa “Palo Redondo”, el dimensionamiento de las turbinas, el área de las tierras a irrigar; por lo que es una variable fundamental en esta investigación.

Para nuestra investigación, otro aspecto a estudiar es el fundamento teórico de los sedimentos y particularmente el comportamiento de los sedimentos del río Santa, ya que este análisis con información actualizada de sedimentos al año 2022, permite definir el volumen muerto del embalse “Palo Redondo” y el volumen útil del mismo. Esto a su vez nos permitirá determinar la cantidad de años que la central hidroeléctrica a pie de presa, asociada a esta obra, podrá funcionar sin el impacto de los sedimentos, que podrían entre otros problemas, generar la disminución de la generación de energía.

Definida la oferta hídrica y los valores mensualizados multianuales de los caudales y masa de agua que van a ingresar a un embalse con propósitos fundamentalmente agrícolas, es importante determinar la demanda hídrica, con lo cual, se podría dimensionar el embalse hídrico de este sistema hidráulico.

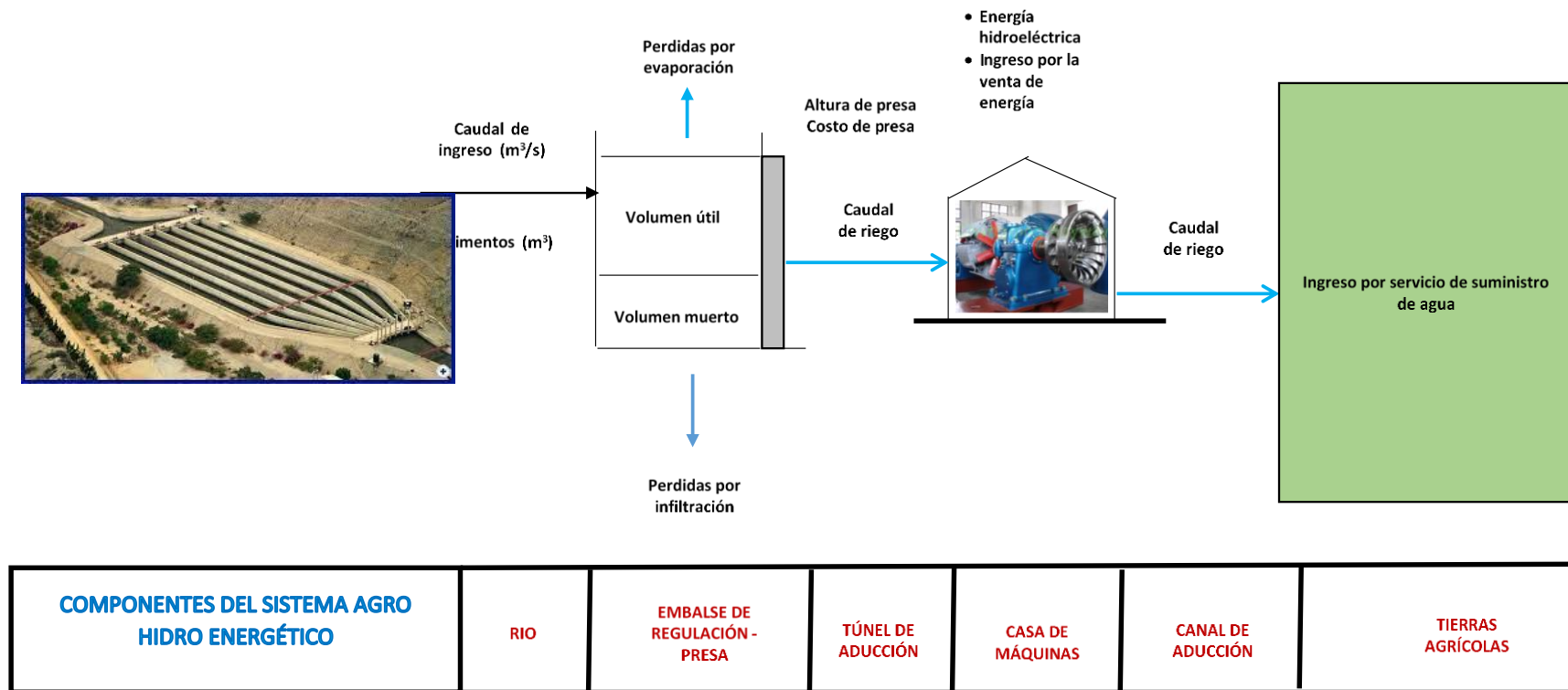
En este contexto también es importante la fundamentación teórica de la regulación del embalse, que nos va a permitir conocer el caudal que, a lo largo del año, va a accionar las turbinas y generar la energía hidroeléctrica.

La fundamentación sobre el aspecto hidráulico, es importante analizarla en términos de pérdidas de carga, desde el embalse hasta el eje de turbinas, que van a incidir en el valor de la energía generada. Estos aspectos determinan la importancia de presentar el Fundamento Teórico del Análisis Hidráulico de este sistema.

El Fundamento Teórico para el Cálculo de la potencia y de la energía que se genere en este sistema hidráulico, está relacionado con el objetivo del presente estudio y en eso radica su importancia. Se presenta la formulación para el cálculo de la Potencia media, así como de la Energía media de la central de Pie de Presa del proyecto Chavimochic.

En la figura 2, se muestra la concepción General del proyecto

Figura 2: Concepción General del proyecto



Elaboración propia

1.2.1 Fundamentación teórica del cálculo de Potencia y Energía medias

1.2.1.1 Caudal turbinado

Volumen de agua por unidad de tiempo que acciona la (s) turbina (s) de la central hidroeléctrica.

Este concepto se emplea para el cálculo de la potencia media de la central hidroeléctrica.

1.2.1.2 Salto bruto de la central hidroeléctrica (H_b)

Es la altura comprendida entre el nivel NAMO y el eje de turbina.

1.2.1.3 Salto neto de la central hidroeléctrica (H_n)

Es el salto bruto menos las pérdidas de carga por fricción o por accesorios

$$H_n = H_b - H_t$$

1.2.1.4 Cálculo de la potencia media

Se calcula la potencia media para la central hidroeléctrica, empleando la siguiente formula:

$$Pe = Ph \times \eta_{tot} / 10^6$$

$$Pe = Ph \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_e / 10^6$$

$$Pe = Q \times h_n \times g \times \gamma \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_e / 10^6$$

Donde:

Pe = Potencia eléctrica (Mw)

Ph = Potencia hidráulica (Mw)

η_{tot} = Eficiencia total

η_t = Eficiencia de la turbina

η_g = Eficiencia del generador

η_e = Eficiencia electrónica

Q = Caudal (m^3/s)

h_n = Altura neta (m)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

γ = Densidad del agua (kg/m^3)

1.2.1.5 Cálculo de la energía media

Se calcula la energía anual generada para una central hidroeléctrica, mediante la siguiente formulación, la misma que fue empleada por el autor en la tesis de Maestría. (Willis, 2014)

$$E_e = Q \times h_n \times g \times \gamma \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_e \times t / 10^6$$

Donde:

E_e = Energía eléctrica (Mwh)

η_{tot} = Eficiencia total

η_t = Eficiencia de la turbina

η_g = Eficiencia del generador

η_e = Eficiencia electrónica

Q = Caudal (m^3/s)

h_n = Altura neta (m)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

γ = Densidad del agua (kg/m^3)

t = Tiempo (horas)

1.2.2 Fundamentación Teórica del análisis hidrológico

En la presente tesis “Optimización de la generación de energía en la Central Hidroeléctrica a Pie de Presa del Proyecto Chavimochic, mediante el control de los sedimentos” en donde se busca plantear un procedimiento de cálculo que permita optimizar la Energía generada, el insumo principal para lograr este propósito es la masa de agua que a su vez está condicionada a un ciclo hidrológico de una determinada cuenca.

En este contexto, tiene bastante sentido, fundamentar adecuadamente todo lo relacionado con el análisis hidrológico y el cuidado que se debe tener al momento de caracterizar la masa de agua, vía estudio de la cuenca, de las condiciones estratigráficas, de la pendiente del terreno, de las características hidrogeológicas del terreno y de ser el caso, del tipo de mediciones que nos den un valor del caudal y de la masa de agua de la cuenca en estudio, en un determinado lugar.

1.2.2.1 Definición de hidrología

Según Aparicio, F.J, “Hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos”. (Aparicio, 1992).

1.2.2.2 Objetivo de la hidrología

Según Aparicio, F.J, “Apoyar en el diseño y operación de proyectos de ingeniería para el control y aprovechamiento del agua”. (Aparicio, 1992).

1.2.2.3 Caudal

Según Domínguez, F.J, “(...) En ellas, la magnitud que tiene mayor importancia es el gasto o caudal, que es el volumen líquido que pasa por una sección en la unidad de tiempo”. (Domínguez, 1945)

1.2.3 Fundamentación Teórica de los Sedimentos

▪ Balance total de solidos

De acuerdo con Proyecto Chavimochic, en su estudio “Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa”, se indica que: “Si consideramos como un sistema al vaso de la presa Palo Redondo, se puede determinar un balance total de sólidos, que consiste fundamentalmente en determinar la masa o peso de sólidos en suspensión o de arrastre que ingresa al vaso; entonces tenemos:

$$\text{Sólidos (Volumen Muerto)} = \text{Sólidos (Ingresa)} - \text{Sólidos (Sale)}$$

Los sólidos que ingresan al sistema consisten en: sólidos en suspensión del canal alimentador que proviene del desarenador, sólidos de las descargas esporádicas por fenómenos extraordinarios (Fenómenos del Niño) y material eólico proveniente de las zonas circundantes a la presa.

La masa o sólidos en suspensión y de arrastre que salen del sistema presa Palo Redondo consisten en sólidos del caudal en el Túnel de Restitución que alimenta al canal Madre, y sólidos del conducto de la purga.”

$$S_{VM} = (S_{CANAL-ALI} + S_{DESC-ESP} + S_{EOL}) - (S_{TR} + S_{PURGA})$$

▪ **Balance parcial de solidos**

“Un balance parcial consiste en determinar los sólidos del volumen muerto en función al caudal que ingrese o descargue del sistema multiplicado por sus respectivas concentraciones; es por ello la necesidad de utilizar las siguientes formulaciones:

- ✓ El caudal sólido en la presa de Palo Redondo se calcula de la siguiente forma:

$$S \text{ (Tn/día)} = 86.40 \times CC \text{ (g/L)} \times Q \text{ (m}^3 \text{ /s)}$$

- ✓ Concentración de sólidos en suspensión (CC) – parámetro determinado en el laboratorio sedimentológico del Desarenador:

$$\text{Concentración (g/L)} = \frac{\text{Peso Sólido en Suspensión (g)}}{\text{Volumen (L)}}$$

Solidos del Canal de Alimentación ($S_{CANAL-ALI}$)

Es el parámetro más importante para determinar la vida útil de la presa; estos flujos de sólidos se determinan en función a la concentración de sólidos en suspensión y el caudal que ingrese a la presa (caudal y concentración de salida del desarenador); así mismo la concentración está en función al % de retención del Sistema-desarenador y la operación de captación; su cálculo se

determinará con la información proporcionada por el laboratorio sedimentológico del desarenador; el cálculo es de la siguiente manera:

$$S_{\text{CANAL-ALI}} (\text{Tn/día}) = 86.40 \times \text{CC} (\text{g/L}) \times Q_{\text{SAL}} (\text{m}^3/\text{s})$$

Solidos de Material Eólico (SEOL)

Consisten en material de intrusión de arenas eólicas al vaso de la presa, por carecer de información y por experiencia se puede determinar que la relación de esta masa con respecto al volumen muerto es aproximadamente cero.

Los Solidos en las descargas esporádicas o extraordinarias, (Fenómeno del Niño) - (S_{DESC-ESP})

En cuanto al transporte de sedimentos en la Quebrada Palo Redondo puede considerarse de menor cuantía con relación al sedimento captado por el río Santa, esto se debe a la escasa escorrentía media anual. Puede efectuarse una estimación del transporte medio anual de acuerdo con la fórmula de Fleming:

$$Q_s = aQ^n$$

Donde:

Q_s = Transporte total medio en toneladas

Q = Caudal medio anual

a y n = Parámetros que dependen del tipo de cobertura vegetal

Solidos en el Túnel de restitución que ingresa al Canal Madre (STR)

El siguiente parámetro está en función a las demandas en la época de estiaje y avenidas; los volúmenes serán alimentados al canal madre. El cálculo de los sólidos en suspensión será de la siguiente manera:

$$\text{STR} (\text{Tn/día}) = 86.40 \times \text{CC} (\text{g/L}) \times Q_{\text{TR}} (\text{m}^3/\text{s})$$

Donde:

STR = Sólidos del canal de restitución, Tn/día

CC = Concentración de sólidos en suspensión, gr/L

QTR = Caudal de salida del túnel de restitución, m³/s

Sólidos en el Conducto de Purga de la Presa Palo Redondo (SPURGA)

$$S_{PURGA} \text{ (Tn/día)} = 86.40 \times CC \text{ (gr/L)} \times Q_{PURGA} \text{ (m}^3 \text{ /s)}$$

Donde:

S_{PURGA} = Sólidos del canal de riego, Tn/día

CC = Concentración de sólidos en suspensión, g/L

Q_{PURGA} = Caudal del canal de purga de la presa, m³ /s

▪ **Determinación de la densidad de los sedimentos depositados.**

El cálculo de este parámetro se basa en la Metodología de la Bureau of Reclamation (Design of Small Dams – Appendix A: Reservoir Sedimentation- Página 651 – Tercera Edición) y según la clasificación de la Presa Palo redondo corresponde al tipo II.

Los embalses se clasifican según su funcionamiento en los indicados en la Tabla 1:

Tabla 1: Clasificación de embalses

Operación	Operación del Embalse
1	Sedimento siempre sumergido o casi siempre sumergido
2	Regulado normalmente a vaciados importantes
3	Embalse habitualmente vacío
4	Sedimento en el lecho del río

La cantidad de sedimentos se puede estimar, mediante la siguiente fórmula:

$$W_t = W_c \rho_c + W_m \rho_m + W_s \rho_s \dots\dots\dots (1)$$

Donde:

ρ_c : Porcentaje de arcilla

ρ_m : Porcentaje de limo

ρ_s : Porcentaje de arena

W_c : Peso unitario inicial de arcilla, kg/m^3

W_m : Peso unitario inicial de lodos, kg/m^3

W_s : Peso unitario inicial de arenas, kg/m^3

Los valores de W_i , pueden obtenerse de la siguiente tabla 2, extraída del Bureau of Reclamation (Design of Small Dams – Appendix A: Reservoir Sedimentation- Página 651 – Tercera Edición) y en función del tipo de operación del embalse.

Tabla 2: Peso unitario inicial

Operación del embalse	Peso unitario Inicial (masa) kg/m^3		
	W_{arcilla}	W_{limo}	W_{arena}
1	416	1120	1550
2	561	1140	1550
3	641	1150	1550
4	961	1170	1550

El Bureau of Reclamation (Design of Small Dams – Appendix A: Reservoir Sedimentation- Página 651 – Tercera Edición), indica textualmente lo siguiente: “Para determinar la densidad del sedimento en el embalse después de un periodo de funcionamiento del mismo (...)”. Miller (28) desarrolló una aproximación de la integral para determinar la densidad media de todo el sedimento depositado en T años de funcionamiento como sigue:

$$W_T = W_1 + 0,4343 K ((T/(T-1)) (L_c T) - 1))$$

Donde:

W_T = densidad media después de T años de funcionamiento

W_1 = peso unitario inicial (densidad) obtenida de la ecuación (1).

K = constante basada en el tipo de funcionamiento del embalse y los ensayos de tamaño de sedimento obtenido de la tabla 3 siguiente:

Tabla 3: Valores de K

Operación del embalse	Valores de K (SI)		
	Arcilla K_s	Limo K_m	Arena K_a
1	0	91	256
2	0	29	135
3	0	0	0

Además:

$$K = K_c \rho_c + K_m \rho_m + K_s \rho_s$$

(Proyecto Especial Chavimochic, 2013).

1.2.4 Fundamentación Teórica de la regulación de embalses

Se debe implementar un procedimiento que permita regular el embalse y el despacho del recurso hídrico, considerando las reglas de control correspondientes y tomando como criterio básico la atención prioritaria del servicio de agua para el consumo humano.

Para la regulación del embalse se aplica la ecuación del balance hídrico y considera los siguientes aspectos, conforme se aprecia en la Figura 3 siguiente:

- Caudal ecológico
- Ingreso de agua. Aporte de un determinado río.
- Perdidas del embalse. Evaporación, filtración.
- Egresos de agua. Despacho de agua para la agricultura.

La simulación de operación de embalses se basa en la solución de la ecuación de continuidad para todo el periodo de análisis.

$$Q_t - D_t - P_t - R_t = VF_i - VI_i \quad (t = 1, 2, 3, \dots, 12)$$

Donde:

Q_t = Aporte natural al embalse en el periodo t

D_t = Descarga en el periodo t

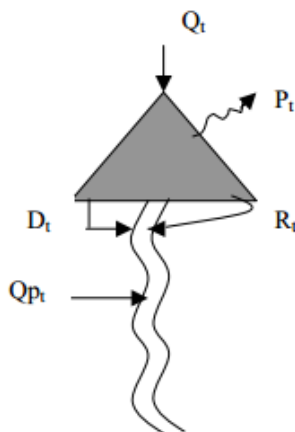
P_t = Pérdidas en el periodo t

R_t = Rebose por el vertedero de demasías en el periodo t

VI_t = Volumen al inicio del periodo t

VF_t = Volumen al final del periodo t

Figura 3: Simulación de la operación de una central hidroeléctrica con embalse



Realizado este trabajo se debe determinar los Planes de Regulación y Escenarios de Investigación.

El procedimiento de evaluación de los posibles planes de regulación considera la operación y manejo del agua entre las diferentes obras hidráulicas de acuerdo con la oferta hidrológica y las demandas hídricas para el consumo humano y para los planes de riego en las diversas áreas agrícolas, que componen este proyecto.

El COES en su Procedimiento Operacional PR-13, para el cálculo de la energía firme de las unidades de generación, indica textualmente lo siguiente:

“La Energía Firme de las Centrales Hidroeléctricas está conformada por los aportes de los Caudales Naturales de aporte intermedio de la cuenca entre el (los) Reservoirios(s) de Regulación Estacional y la(s) central(es), y por los aportes debidos a la(s) descarga(s) del (los) reservorios(s).”

Para la determinación de la Energía Firme anual de la(s) Central(es) Hidroeléctricas, se simula su operación para los doce meses del año; teniendo como objetivo maximizar su generación anual, considerando lo siguiente:

- ‘d) En el caso de nuevos Reservoirios de Regulación Estacional, se calculará el volumen inicial como el 50% de su capacidad útil y como volumen final la capacidad mínima del Reservoirio de Regulación Estacional. Conforme se disponga de información histórica, ésta se utilizará para el cálculo del volumen inicial y final del Reservoirio de Regulación Estacional de acuerdo a lo señalado en los ítems b) y c) respectivamente.
- e) Restricciones por riego, agua potable y caudal ecológico (correspondiente solo a las derivaciones en trayectoria cuya parte del agua captada se traslada y retorna al río) de acuerdo con los estudios que las sustenten.
- f) Capacidades máximas de túneles, canales, compuertas y restricciones operativas informadas por el Generador Integrante.
- g) El volumen mínimo de los Reservoirios de Regulación Estacional en los meses de simulación.
- h) Pérdidas por filtración y evaporación que correspondan, determinado con la información presentada por el titular para el Estudio Hidrológico Anual referido en el PR-41 (...).

(COES, 2023).

1.2.5 Fundamentación teórica del análisis hidráulico

En el presente trabajo de investigación, es necesario la determinación de las pérdidas de carga del sistema hidroeléctrico, el mismo que tiene una incidencia directa en el funcionamiento de este sistema y en las condiciones de generación de energía eléctrica.

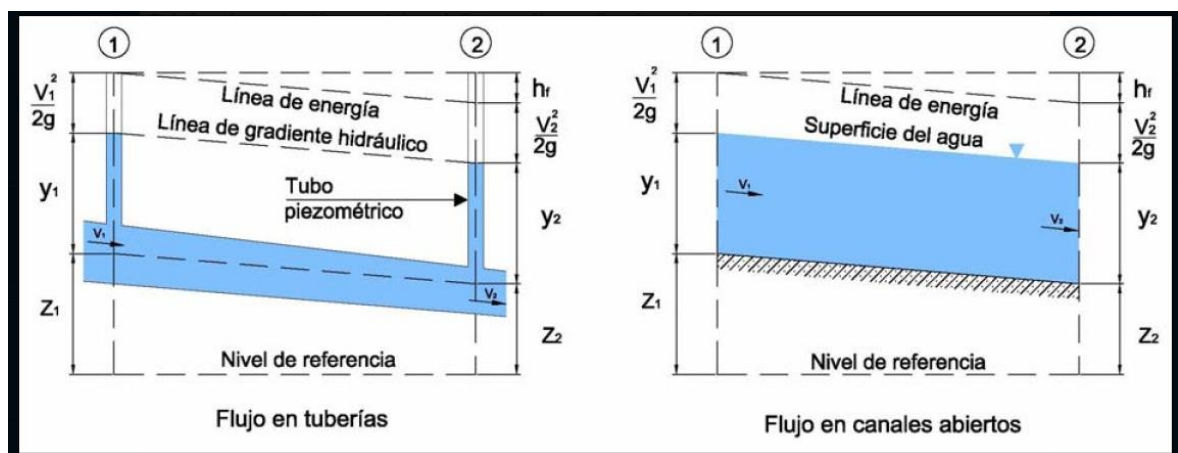
A continuación, presentamos algunos conceptos básicos de la hidráulica:

1.2.5.1 Flujo en canales abiertos

Según V.T. Chow, Capítulo 1. Flujo en Canales abiertos y su clasificación. Folios 3 y 4, “El flujo de agua en un conducto puede ser flujo en canal abierto o flujo en tubería. Estas dos clases de flujo son similares en muchos aspectos, en tanto que el flujo en tubería no la tiene, debido a que en este caso el agua debe llenar completamente el conducto. Una superficie libre está sometida a la presión atmosférica. El flujo en tubería, al estar confinado en un conducto cerrado, no está sometido a la presión atmosférica de manera directa, sino a la presión hidráulica.”. (V.T. Chow 2004).

la diferencia entre estos flujos está representada en la figura 4, que se muestra a continuación.

Figura 4: esquemas comparativos entre flujos en tubería y en canal abierto



1.2.5.2 Tipos de Flujo en canales abiertos

Según V.T. Chow, páginas 5 y 6, la clasificación de los tipos de flujo es la siguiente:

- A) Flujo permanente
 - 1. Flujo uniforme
 - 2. Flujo variado
 - a. Flujo gradualmente variado
 - b. Flujo rápidamente variado

B) Flujo no permanente

1. Flujo uniforme no permanente
2. Flujo no permanente
 - a. Flujo gradualmente variado no permanente
 - b. Flujo rápidamente variado no permanente

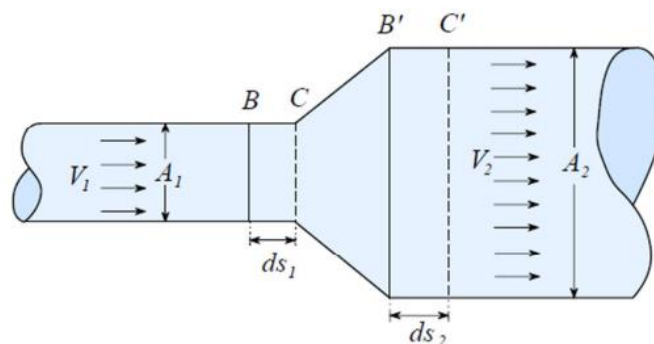
(V.T. Chow 2004).

1.2.5.3 Ecuaciones Fundamentales de la Hidráulica

Ecuación de la Continuidad o Ley de Castelli

Esta ecuación expresa la invariabilidad de la cantidad de masa de un fluido con respecto al estado de movimiento, conforme se gráfica en la figura 5.

Figura 5: Ecuación de la Continuidad



De acuerdo a Camargo, J.E, Franco, V, “Hidráulica de canales” (página 7), la ecuación de la continuidad viene dada por la siguiente relación:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2, \text{ ó }$$

$$Q_1 = Q_2$$

(Camargo, 1999).

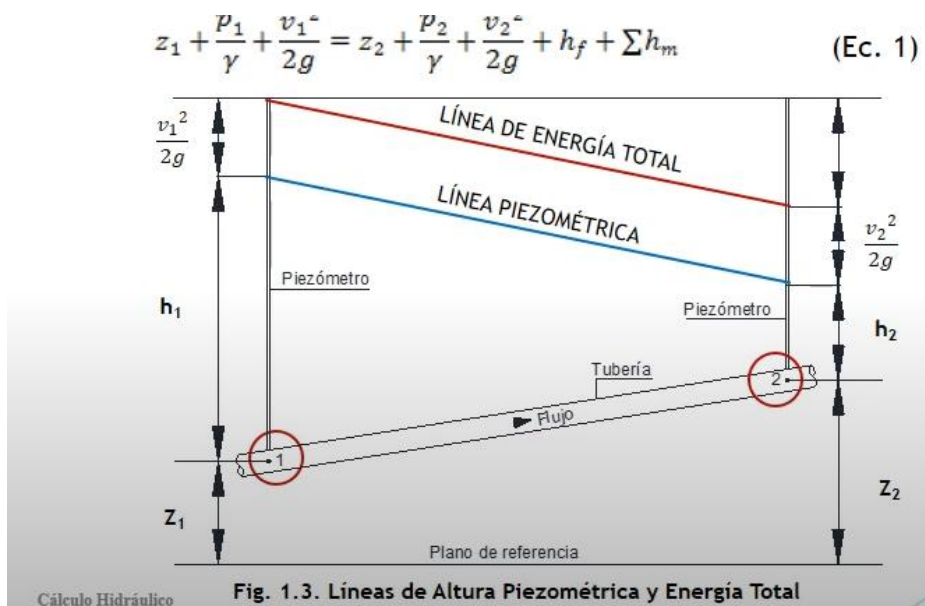
Ecuación de la Energía – Ecuación de Bernoulli.

La forma más conocida de la ecuación de Bernoulli, para un fluido perfecto, es aquella en la que la energía total se expresa por unidad de peso (m-kg/kg), y que se muestra a continuación (ver figura 6):

De acuerdo con Domínguez, S, Página 34, la ecuación de la continuidad está dada por la siguiente:

$$E = Z + \frac{P}{\gamma} + \alpha \frac{V^2}{2g} = cte \quad \text{ó} \quad E = Z + y + \alpha \frac{V^2}{2g} = cte$$

Figura 6: Ecuación de la Energía



La ecuación de la energía por unidad de peso, para un fluido real, para el tramo 1 y 2 se representa como:

$$E = Z_1 + y_1 + \alpha \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + y_2 + \alpha \frac{V_2^2}{2g} + h_f(1-2)$$

Donde:

$$Z_i = \text{Energía de posición}$$

Y = Tirante de la sección

V = Velocidad Media

α = Coeficiente de Coriolis

h_{f1-2} = Pérdida de energía interna entre 1 y 2.

(Domínguez, 1945)

1.2.5.4 Pérdidas de carga

El estudio de las pérdidas de carga es muy importante en la hidráulica, ya que el conocimiento de ellas permitirá el cálculo de los niveles de energía, que resultan de vital importancia para el dimensionamiento de las Obras hidráulicas.

Las pérdidas de carga ($h_{\text{pérdidas}}$) se componen de dos tipos: i) pérdidas de carga lineales o de fricción (h_f); y, ii) pérdidas locales (h_l); y está dada por la siguiente relación:

$$h_{\text{pérdidas}} = h_f + h_l$$

Las pérdidas de carga en general se acostumbran a medir en relación a la altura de la carga de velocidad, afectada por un factor de resistencia o coeficiente de pérdida (K) y se expresa como:

$$h = K \frac{V^2}{2g}$$

Pérdidas de carga por fricción

Se puede obtener por intermedio de la fórmula de Darcy – Weisbach:

$$h_f = f (L/D)(v^2/2g)$$

Donde:

h_f = Pérdida de carga debida a la fricción. (m)

f = Factor de fricción de Darcy. (adimensional)

L = Longitud de la tubería. (m)

D = Diámetro de la tubería. (m)

V = Velocidad media del fluido. (m/s)

g = Aceleración de la gravedad = 9,80665 m/s².

Pérdidas locales, secundarias o singulares

Este tipo de pérdidas se presentan entre otros, en estrangulamientos, ensanchamientos, cambios de dirección, y sus coeficientes están dados en el siguiente cuadro:

1.2.6 Fundamentación teórica de la determinación de la demanda hídrica

En el presente trabajo de investigación, es necesario la determinación de la demanda hídrica de los diversos usuarios del proyecto Chavimochic: uso poblacional; uso hidroeléctrico; uso agrícola; ya que estos valores mensualizados nos permitirán dimensionar el embalse “Palo Redondo” así como determinar la capacidad de la (s) turbina (s).

A continuación, presentamos la definición de demanda hídrica:

1.2.6.1 Definición

Según CEDEX “Criterios de garantía en la planificación de regadíos” (año 2002, 215 p.), indica textualmente lo siguiente:

“Una demanda de agua queda definida, como ya se indicó en el capítulo 3, por los siguientes parámetros, conforme a lo previsto en el RAPAPH (art" 74.2):

- El volumen anual y la distribución temporal de los suministros necesarios, así como las condiciones de calidad exigibles
- El nivel de garantía de los suministros para los diferentes usos
- El consumo bruto, es decir, la porción del suministro que no retoma al sistema hidráulico

- El volumen anual y la distribución temporal del retomo y previsión de la calidad previa a cualquier tratamiento”

(CEDEX, 2002)

1.3 Definiciones Conceptuales

1.3.1 Potencia Nominal

Es el valor a plena carga de la unidad o planta de generación bajo las condiciones específicas según diseño del fabricante, dicha capacidad está indicada en la placa de características vinculada al equipo respectivo de generación.

1.3.2 Potencia Efectiva

Indica la capacidad real de energía que las centrales pueden entregar de forma continua al mercado eléctrico.

La potencia efectiva es el rendimiento real al que operan las centrales, es decir es lo que efectivamente pueden producir de electricidad.

1.3.3 Potencia Garantizada

La Potencia Garantizada de una Central es la Potencia proporcionada por los reservorios horarios y reservorios estacionales con capacidad de regulación.

1.3.4 Energía Hidroeléctrica Generada en una central a pie de presa

La energía hidroeléctrica generada en una central a pie de presa es una fuente de energía renovable que se produce turbinando una masa de agua, aprovechando la carga que existe entre el nivel de aguas normales de un embalse y el eje de la turbina.

1.3.5 Central Hidroeléctrica a pie de presa

Es un tipo de central hidroeléctrica, que se define así por su ubicación, inmediatamente aguas abajo de un embalse.

1.3.6 Embalse hidráulico

Es una estructura hidráulica cuya finalidad es la de almacenar agua, proveniente de un curso de agua.

1.3.7 Presa

Es una estructura hidráulica cuya finalidad es la cerrar el curso de agua y con ello posibilitar el embalse de las aguas, para ser posteriormente empleada en diversas formas: hidroeléctrica, riego, saneamiento, ocio, etc.

1.3.8 Sala de máquinas

Es la construcción donde se ubican las máquinas de una central hidroeléctrica (turbinas, generadores) y elementos de regulación y control.

1.3.9 Turbina hidroeléctrica

Es una turbomáquina motora que transforma la energía cinética de una corriente de agua en energía mecánica.

1.3.10 Definición y objetivo de la Hidrología

Según Aparicio, F.J, existen varias definiciones de hidrología, pero la más completa es quizás la siguiente:

"Hidrología es la ciencia natural que estudia al agua, su ocurrencia, circulación y distribución en la superficie terrestre, sus propiedades químicas y físicas y su relación con el medio ambiente, incluyendo a los seres vivos. "

“Aceptando esta definición, es necesario limitar la parte de la hidrología que se estudia en la ingeniería a una rama que comúnmente se llama ingeniería hidrológica o hidrología aplicada, que incluye aquellas partes del campo de la hidrología que atañen al diseño y operación de proyectos de ingeniería para el control y aprovechamiento del agua.”

“El objetivo de la hidrología aplicada es la determinación de esos eventos. Los resultados son normalmente sólo estimaciones, con aproximación limitada en muchos casos y burda en algunos otros.

El análisis hidrológico exhaustivo es, pues, el primer paso fundamental en la planeación, diseño y operación de proyectos hidráulicos. En la fase de planeación y diseño, el análisis se dirige básicamente a fijar la capacidad y seguridad de estructuras hidráulicas. Las dimensiones físicas o la capacidad de conducción de una estructura hidráulica se determinan, desde luego, de acuerdo con los volúmenes y gastos que se deseen almacenar, controlar o transmitir. En este sentido, se requieren estudios hidrológicos para determinar la disponibilidad de fuentes naturales y para saber si el abastecimiento de la fuente es adecuado en todo tiempo, o si se requerirá de otras estructuras para corregir las deficiencias o para disponer de los volúmenes excedentes de agua.”. (Aparicio, 1992).

1.3.10.1 Concepto de Cuenca

Según Aparicio, F.J, “una cuenca es una zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida.”

“La definición anterior se refiere a una cuenca superficial; asociada a cada una de éstas existe también una cuenca subterránea, cuya forma en planta es semejante a la superficial. De ahí la aclaración de que la definición es válida si la superficie fuera impermeable.”

“Desde el punto de vista de su salida, existen fundamentalmente dos tipos de cuencas: endorreicas y exorreicas. En las primeras el punto de salida está dentro de los límites de la cuenca y generalmente es un lago; en las segundas, el punto de salida se encuentra en los límites de la cuenca y está en otra corriente o en el mar.”. (Aparicio, 1992).

1.3.10.2 Escurrimiento

Según Aparicio, F.J, “el escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. El agua proveniente de la precipitación que llega hasta la superficie terrestre -una

vez que una parte ha sido interceptada y evaporada- sigue diversos caminos hasta llegar a la salida de la cuenca. Conviene dividir estos caminos en tres clases: escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y escurrimiento subterráneo.”. (Aparicio, 1992).

1.3.11 Coagulación

Es un proceso en el cual se libera al agua de una variedad de impurezas, solubles e insolubles, entre estas últimas destacan las partículas coloidales, las sustancias húmicas y los microorganismos en general. Tales impurezas coloidales presentan una carga superficial negativa, que impide que las partículas se aproximen unas a otras y que las lleva a permanecer en un medio que favorece su estabilidad.

Este proceso se logra incorporando al agua con sales de aluminio y hierro, presentándose dos fenómenos:

- El primero, esencialmente químico, consiste en las reacciones del coagulante con el agua y la formación de especies hidrolizadas con carga positiva. Este proceso depende de la concentración del coagulante y el pH final de la mezcla.
- El segundo, fundamentalmente físico, consiste en el transporte de especies hidrolizadas para que hagan contacto con las impurezas del agua.

Este proceso es muy rápido, toma desde décimas de segundo hasta cerca de 100 segundos, de acuerdo con las demás características del agua: pH, temperatura, cantidad de partículas, etcétera. (Vargas, 2004).

1.3.12 Floculación

Es un proceso que se lleva a cabo en una unidad de tratamiento denominada mezcla rápida. De allí en adelante, se necesitará una agitación relativamente lenta, la cual se realiza dentro del floculador. En esta unidad las partículas chocarán entre sí, se aglomerarán y formarán otras mayores denominadas flóculos; estas pueden ser removidas con mayor eficiencia por los procesos de sedimentación, flotación o filtración rápida. (Vargas, 2004).

1.3.13 Sedimentación

Se entiende por sedimentación la remoción por efecto gravitacional de las partículas en suspensión presentes en el agua. Estas partículas deberán tener un peso específico mayor que el fluido.

La remoción de partículas en suspensión en el agua puede conseguirse por sedimentación o filtración. De allí que ambos procesos se consideren como complementarios.

La sedimentación remueve las partículas más densas, mientras que la filtración remueve aquellas partículas que tienen una densidad muy cercana a la del agua o que han sido re suspendidas y, por lo tanto, no pudieron ser removidas en el proceso anterior.

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada. A menudo se utilizan para designar la sedimentación los términos de clarificación y espesamiento. Se habla de clarificación cuando hay un especial interés en el fluido clarificado, y de espesamiento cuando el interés está puesto en la suspensión concentrada. (Vargas, 2004).

1.4 Operacionalización de variables

Se muestra en la Tabla 4 siguiente

Tabla 4: Operacionalización de variables

Variables	Definición de la Variable	Dimensión	Indicadores	Instrumento
Energía Generada en la Central Hidroeléctrica a pie de presa. Variable Dependiente	Es la energía generada en la Central Hidroeléctrica a Pie de presa, producida esencialmente, por la masa de agua del embalse y por la altura entre el nivel de aguas normales y el eje de las turbinas.	Económica	Cantidad de energía hidroeléctrica generada (GWh)	El cálculo de la energía durante la vida útil de las obras, considerando el impacto que significa la reducción de la masa de agua debido a la colmatación.
La sedimentación en el embalse. Variable Independiente	La sedimentación en el embalse es el flujo de solidos en suspensión que ingresa tanto al desarenador como al embalse (provenientes del	La cantidad de sedimentación en el embalse	Cantidad de sedimentos que ingresan al desarenador y salen del desarenador	Toma de muestras al ingreso del desarenador. Cálculo de la velocidad de sedimentación en el embalse

	desarenador), durante la vida útil de las obras de la Central Hidroeléctrica a pie de presa.			
		La velocidad del flujo de sedimentación que llega al embalse	Cantidad de sedimentos que llegan al embalse	Toma de muestras a la salida del desarenador. Cálculo de la velocidad de sedimentación en el embalse

1.5 Hipótesis

1.5.1 Estructura de la hipótesis

Si se elabora científicamente un procedimiento sustentado en las teorías eléctricas, mecánicas, hidrológicas, sedimentológicas, hidráulicas, que permita controlar la sedimentación temprana del embalse de una central hidroeléctrica a pie de presa, entonces se podría optimizar la producción de energía, durante el periodo de operación de la central hidroeléctrica a pie de presa de Chavimochic.

1.5.1.1 Identificación de variables

- Variable dependiente

Energía Generada en la Central Hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic.

- Variable independiente

La velocidad de sedimentación en el embalse.

- Termino relacionador

El termino lógico o relacionador es entonces.

- Unidad de análisis

La Central Hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic.

1.5.1.2 Conceptualización de variables

- Variable dependiente

Energía Generada en la Central Hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic, es la energía que se genera por la acción de la masa de agua almacenada en el embalse “Palo Redondo” que a una cierta altura acciona sobre las turbinas hidráulicas.

- Variable independiente

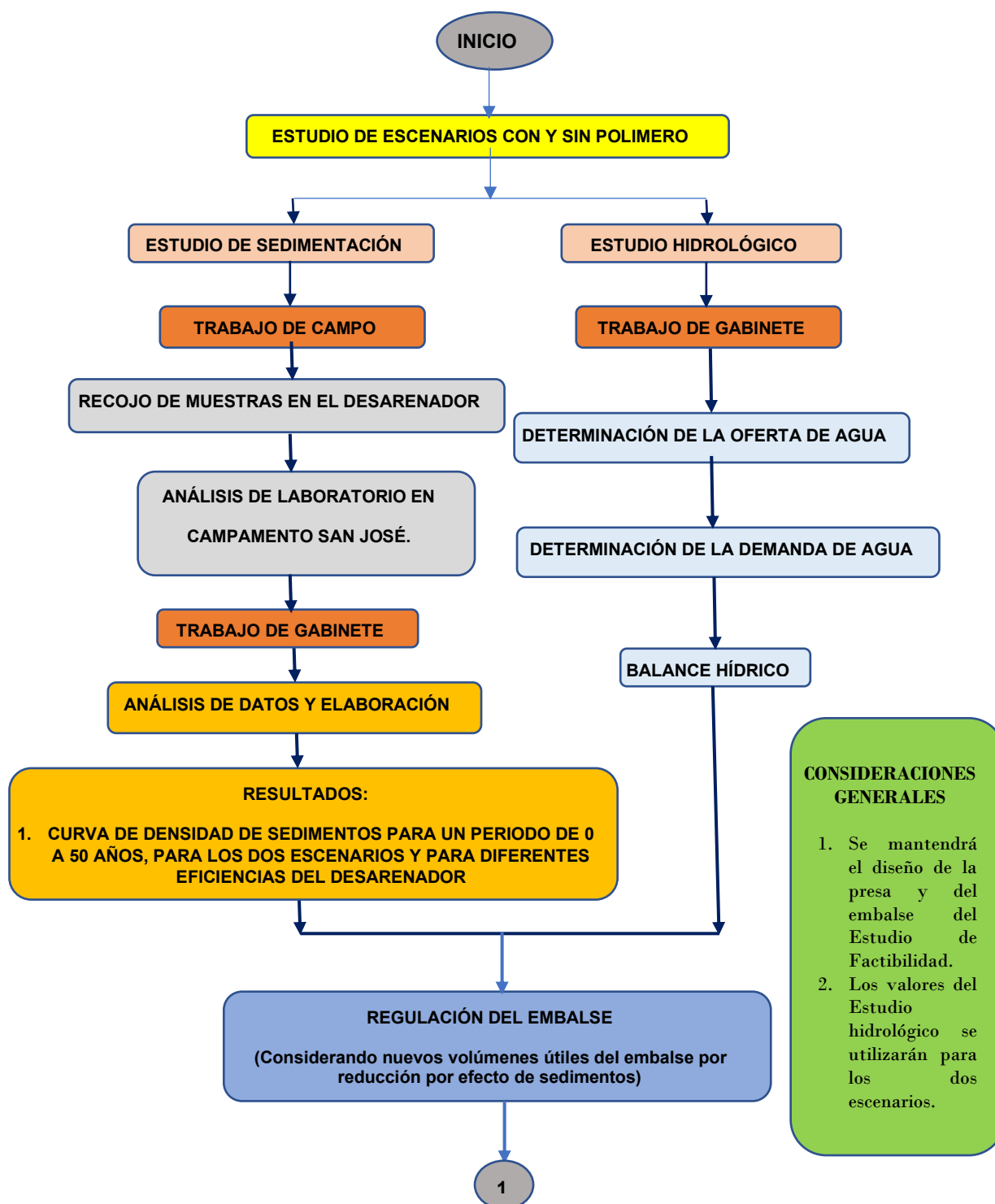
La velocidad de sedimentación es el nivel de depósito de sedimentos en el lecho del embalse “Palo Redondo”.

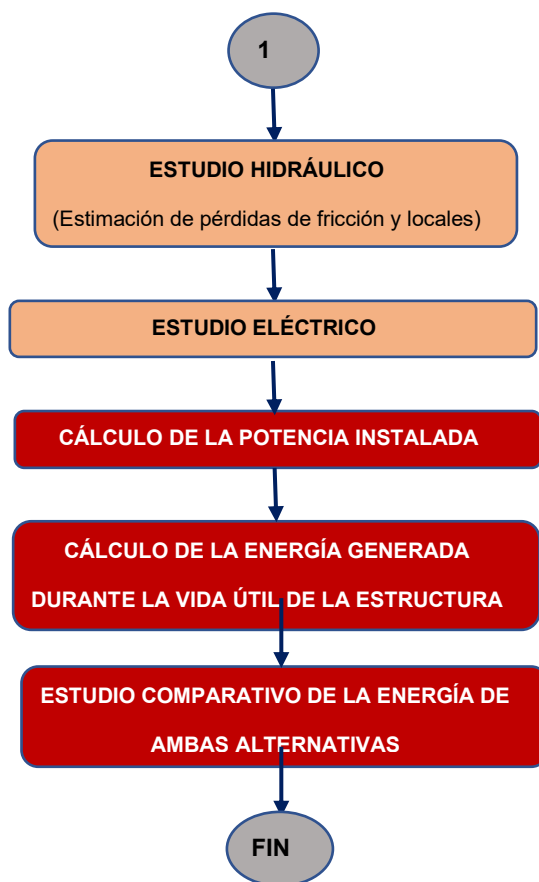
CAPITULO II: METODOS Y MATERIALES

CAPITULO II: METODOS Y MATERIALES

En la siguiente figura 7, se presenta el flujo de las diversas tareas del trabajo de campo y de gabinete, que permitirán desarrollar la presente investigación y a la vez permitirá comprender los objetivos y la envergadura del presente trabajo de investigación.

Figura 7: Flujo de trabajo para el desarrollo de la investigación.





Elaboración propia

Elaboración propia

2.1 Tipo de Investigación

El presente trabajo de investigación será del tipo aplicada, ya que tomando como referencia la investigación del tipo básico o puro, la teoría se encarga de resolver un problema práctico (ARIAS Gonzales, Jose L; COVINOS G. Mitsuos, 2021), como es la optimización de la producción de energía en la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic, mediante el control de la sedimentación temprana del embalse.

2.2 Método de Investigación

El método del presente trabajo de investigación es cuantitativo, ya que se emplean datos numéricos relacionados con la concentración de sólidos en suspensión, medidos en laboratorio y calificados en gr/l, a la entrada y a la salida del

desarenador del proyecto Chavimochic; como una forma de medir su impacto en la producción de energía en los diversos escenarios planteados.

Asimismo, los resultados de este trabajo de investigación son también numéricos y nos van a permitir, describir el fenómeno en estudio y determinar una función prospectiva de la velocidad de sedimentación en el embalse durante el tiempo de operación de esta obra, aspecto que está asociado a la generación de energía.

2.3 Diseño de Contrastación

El diseño de la contrastación de la hipótesis será del tipo Ex – post facto, donde se remite a una variable causa, con una validez interna, relacionada con los cambios producidos por la variable dependiente, en este caso la generación de energía hidroeléctrica, debido únicamente, a la acción o impacto de una variable independiente, en este caso, la cantidad de sedimentos que ingresan al embalse “Palo redondo”.

En el diseño de la contrastación de la hipótesis que será del tipo Ex – post facto, para validar la hipótesis planteada, se requiere calcular el valor de energía de la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic, para diferentes escenarios de ingreso de sedimentos al embalse “Palo Redondo”.

2.4 Población, Muestra y Muestreo

La población del proyecto de investigación la constituye todas las centrales hidroeléctricas a pie de presa en el Perú.

La muestra del proyecto de investigación la constituye la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic.

El muestreo se realizó considerando el siguiente procedimiento:

- a. Estudiando el conjunto de centrales hidroeléctricas a pie de presas que existen en el Perú.
- b. Seleccionando aquellas centrales hidroeléctricas a pie de presa que no se hayan construido.

- c. Seleccionando aquellas centrales hidroeléctricas a pie de presa que cuentan con algún estudio, sin tomar en cuenta la antigüedad de este.

2.5 Técnicas, Instrumentos, Equipos y Materiales de Recolección de Datos

2.5.1 La técnica de recolección de datos

Se empleará la técnica de recolección de muestras de agua extraídas de diversos puntos de control del sistema hidráulico, esencialmente a la entrada y a la salida del desarenador del Proyecto Especial Chavimochic.

Esta recolección de datos la realiza en forma diaria, el personal de laboratorio de control de sedimentos del Proyecto Especial Chavimochic.

2.5.2 Los instrumentos utilizados para la recolección de datos.

El personal del Proyecto Especial Chavimochic utiliza los siguientes instrumentos para la recolección de datos:

- Hojas de levantamiento de datos, donde se coloca los detalles de la muestra recogida: i) lugar; ii) hora de toma de muestra; iii) nombre de la persona de toma los datos; iv) peso; entre otros.
- Muestreador cilíndrico

2.5.3 Los equipos utilizados para la recolección de datos

- Sonda clapé, sin lastre en la estación desarenador
- winche o malacate

En las figuras 8, 9 y 10, que se muestran a continuación, se puede apreciar el sistema de medición tanto a la entrada como a la salida del desarenador. Asimismo, se muestra las etapas de muestreo y la sonda clapé.

Figura 8: Ejemplo de medición de sedimentos en ingreso al desarenador

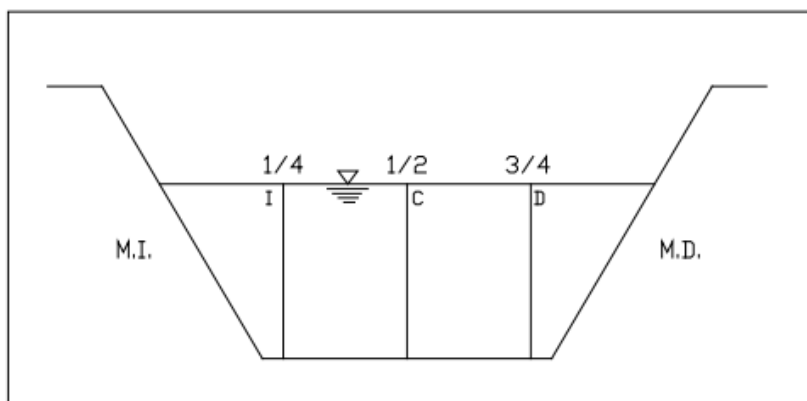


Figura 9: Ejemplo de medición de sedimentos a la salida del desarenador

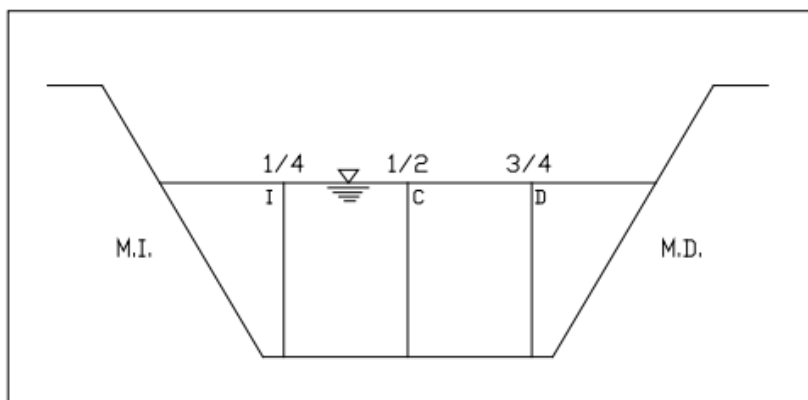


Figura 10: Etapas de muestreo y sonda clapé



2.5.4 Materiales de recolección de datos

- embudo,
- botellas de plástico,
- etiquetas,
- horno eléctrico,
- desecador,
- balanza electrónica,
- frascos de vidrio.

2.6 Procesamiento y Análisis de Datos

2.6.1 Consideraciones generales

El Proyecto Especial Chavimochic en su “Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa. Volumen IV. Anexos”, indica lo siguiente:

“La determinación de la concentración de sedimentos en suspensión, en CHAVIMOCHIC ha tenido una evolución en cuanto a la metodología de medición. En los años 1999 a 2003 la determinación de la concentración de sedimentos se realizaba por evaporación de agua de una porción de la muestra (100 mililitros), separando los sedimentos en suspensión y precipitados por la evaporación descontando los sólidos de las sales y minerales disueltas. El otro método empleado es el de filtrado utilizando bombeo al vacío, y finalmente el filtrado por gravedad que es el que se emplea actualmente, desde 2003 a la fecha.

El cálculo de la concentración de sólidos se realiza relacionando el peso de los sedimentos retenidos en el filtro entre el volumen de agua, de la muestra expresada en gr/L.

En la Estación Desarenador, tanto en el Ingreso como en la salida de aguas, el monitoreo se realiza cuatro veces al día, a las 00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 horas y en las estaciones ubicadas aguas abajo de la salida del Desarenador, la toma de muestras se realiza dos veces al día.

La metodología de análisis empleada para la determinación de Sólidos en Suspensión es el Filtrado por Gravedad y, utilizando para la separación de sólidos del agua papel filtro. Estos filtros que contienen sedimentos son codificados y almacenados en el Laboratorio para Análisis de Textura y Densidad Aparente de Sedimentos.”. (Proyecto Especial Chavimochic, 2013).

2.6.2 Recursos utilizados para el tratamiento de las muestras

Conforme señala el Proyecto Especial Chavimochic en su “Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa. Volumen IV. Anexos”, se cuenta con:

- Recursos humanos: Un (01) ingeniero Químico responsable del Laboratorio
- Recursos materiales:
 - ✓ Agua destilada
 - ✓ papel filtro
 - ✓ material de vidrio
 - ✓ material de escritorio
 - ✓ material de impresión
 - ✓ hexametáfosfato de sodio, etc.
- Equipamiento:
 - ✓ 01 computadora
 - ✓ 01 impresora
 - ✓ 01 estufa
 - ✓ 01 destilador
 - ✓ 01 juego de equipos – prueba de Bouyuocos
 - ✓ 01 equipo phi metro
 - ✓ 01 medidor de TDS
 - ✓ 01 turbidímetro
 - ✓ 01 conductímetro
 - ✓ 01 balanza Analítica
 - ✓ 01 desecador
 - ✓ 60 jarras de plástico
 - ✓ 60 embudos plásticos

- ✓ 60 frascos de vidrio receptores de agua

(Proyecto Especial Chavimochic, 2013).

En las figuras 11, 12 y 13 se muestra al ingeniero químico, responsable del laboratorio de suelos del Proyecto Especial Chavimochic, con el suscrito en la visita realizada en octubre del 2021)

Figura 11: Visita en el laboratorio de suelos del Proyecto Especial Chavimochic



Figura 12: Visita en el laboratorio de suelos del Proyecto Especial Chavimochic



Figura 13: Visita en el laboratorio de suelos del Proyecto Especial Chavimochic



2.6.3 Procesamiento y análisis de datos propiamente dichos

Conforme señala el Proyecto Especial Chavimochic en su “Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa. Volumen IV. Anexos”, el procedimiento para el procesamiento y análisis de las muestras tomadas en la entrada y en la salida del desarenador, tiene por objetivo determinar la concentración de sólidos en suspensión, y calidad de agua, para lo cual se calculan los siguientes parámetros:

- pH, que arroja la acidez del agua
- conductividad eléctrica de una muestra de agua, es la medición de su capacidad para transportar una corriente eléctrica
- TDS,
- Turbidez, indica la cantidad de materia sólida suspendida en el agua y se mide por la luz que se refleja a través de esta materia
- Temperatura

Para la evaluación de la densidad real de sedimento, se utiliza el método de Bouyoucos:

- a. Pesar y transferir al vaso de la licuadora, 10gr de suelo seco.
- b. Agregar 100ml de agua destilada y 10ml al agente dispersante.

- c. Dejar reposar durante 5 minutos y luego agitar durante 5 minutos en el batidor mecánico.
- d. Después de agitar, se vierte todo el contenido en un cilindro de 1,000cc, cuidando de no perder material de suelo, luego completar a volumen con el hidrómetro dentro.
- e. Una vez enraizado, se agita la suspensión por espacio de un minuto, tapando con la mano el extremo abierto. Si se produce espuma, que impida leer en el hidrómetro, se agrega 5 gotas de alcohol amílico.
- f. A cada lectura, efectuada se debe tomar, la temperatura de la suspensión, con el fin de obtener, el factor de corrección.
- g. Para el método normal, las lecturas deben efectuarse a los 40 segundos, la primera y a las 2 horas la segunda lectura.

Con las siguientes fórmulas conoceremos los porcentajes de arcilla, limo y arena:

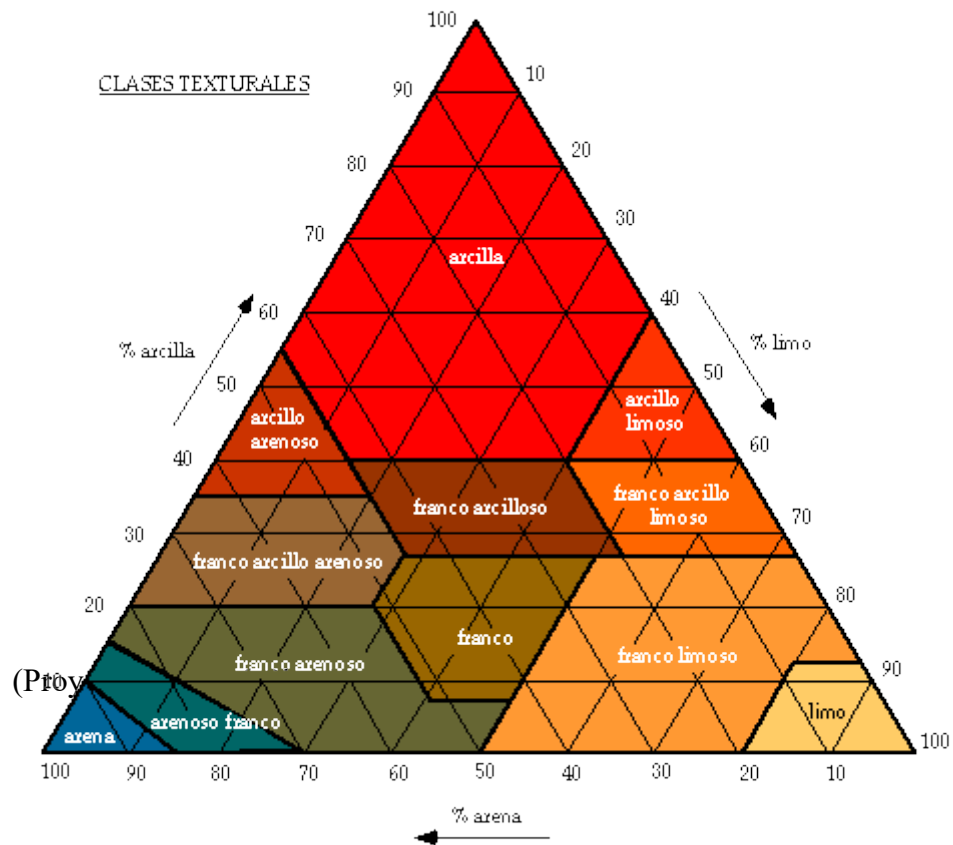
$$\% \text{ Arena} = \frac{100 - (1^\circ \text{ Lect. Hidrómetro} + (1^\circ \text{ lectura Termómetro} - 20) \times 0,20) \times 100}{\text{Peso de la muestra}}$$

$$\% \text{ Arcilla} = \frac{(2^\circ \text{ Lect. Hidrómetro} + (2^\circ \text{ lectura Termómetro} - 20) \times 0,20) \times 100}{\text{Peso de la muestra}}$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ Arena} + \% \text{ Arcilla})$$

Con los citados porcentajes y utilizando el triángulo textural (ver figura 14), identificamos la clase textural a la que pertenece, y con ello, determinar la concentración de sólidos en suspensión.

Figura 14: Triángulo textural



CAPITULO III: RESULTADOS

CAPITULO III: RESULTADOS

Los resultados que se muestran a continuación están relacionados con las diferentes investigaciones realizadas en la elaboración de la presente tesis:

- a) Estudio hidrológico
- b) Estudio sedimentológico
- c) Estudio de la regulación de embalses para los diferentes escenarios (años de operación de la central hidroeléctrica a pie de presa)
- d) Cálculos hidráulicos (pérdidas de carga)
- e) Cálculo de la potencia media de la Central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic
- f) Cálculo de energía generada durante la operación de la central hidroeléctrica a pie de presa

La presente investigación está relacionada con el proyecto Chavimochic¹, por tanto, es conveniente mostrar el ámbito y componentes principales de este proyecto, en sus tres etapas, conforme a la siguiente figura 15:

¹ Extraído del Informe 2 "servicios de ingeniería especializada. revisión de los aspectos hidrológicos y sustentación del esquema de despacho y entrega de agua para los usos poblacional, agrícola e hidroeléctrico del proyecto", elaborado por el Consorcio Chavimochic III, integrado por las empresas Nippon Koei Co. Ltd., Nippon Koei Latin América & Caribbean Co. Ltd., Ingeniería Civil Internacional S.A.- INCISA, y Universidad ESAN. Año 2013. 104 p.

3.1 Del Estudio Hidrológico

El estudio hidrológico realizado es un objetivo específico, indicado en el numeral 1.4.2 de la presente tesis, que indica textualmente:

“Elaborar el estudio hidrológico de las aguas del río Santa y obtener el caudal y la masa de agua derivables al embalse Palo Redondo”

En consecuencia, se realiza el estudio hidrológico al río Santa, cuyas aguas están compartidas entre el proyecto Chavimochic y el proyecto Chincas, de acuerdo con lo dispuesto en el Acta de Acuerdos del 17 de noviembre de 2008 entre el Intendente de Recursos Hídricos, y los Gerentes Generales de los Proyectos Chavimochic y Chincas, aprobada mediante Resolución de Intendencia N° 1011-2008-INRENAIRH de fecha 17.12.2008.

Recientemente, se publicó el Plan de Aprovechamiento de las Disponibilidades Hídricas del Sistema Hidráulico Común del Río Santa Año Periodo 2023-2024, aprobado con Resolución Directoral N° 0515-2023-ANA-AAA.HCH.

El estudio hidrológico emplea la data hidrológica del río Santa desde el año 1978 hasta el año 2023 y toma en consideración la Resolución Directoral N° 0515-2023-ANA-AAA.HCH anteriormente indicada:

- Máxima capacidad de derivación a Chavimochic: 96 m³/s
- Caudal ecológico del río Santa: 5 m³/s
- Caudal para reparto en estiaje igual o menor a: 45 m³/s
 - Porcentaje de reparto del caudal para Chincas en estiaje: 60%
 - Porcentaje de reparto del caudal para Chavimochic en estiaje: 40%
- Porcentaje de reparto del caudal para Chincas si $Q > 45 \text{ m}^3/\text{s}$: 50%
- Caudal máximo derivable a Chincas: 78 m³/s
- Caudal en el río para satisfacer las demandas de los proyectos Chavimochic y Chincas: 178 m³/s

3.1.1 Oferta hídrica del río Santa

- En la tabla 5 se muestran los datos hidrológicos desde el año 1978 al año 2023, que contiene la oferta hídrica del río Santa para los proyectos de Chincas y Chavimochic. En dicha tabla se observa un caudal promedio multianual de 137.92 m³/s, un caudal máximo mensualizado multianual es

de 740.34 m³/s, un caudal mínimo mensualizado multianual de 29.25 m³/s. Asimismo, estos datos se grafican en la figura 16.

- En la tabla 6 se muestra la data hidrológica desde el año 1978 al año 2023, que contiene los caudales para el proyecto Chavimochic, aplicando la restricción de caudales de 45 m³/s, mencionado en el numeral 3.1 anterior. En dicha tabla se observa que, en estas condiciones, el caudal promedio multianual es de 68.40 m³/s, un caudal máximo mensualizado multianual de 355.52 m³/s, un caudal mínimo mensualizado multianual de 11.70 m³/s. Asimismo, estos datos se muestran en la figura 17.
- En la tabla 7 se muestra la data hidrológica desde el año 1978 al año 2023, que contiene los caudales para el proyecto Chavimochic, aplicando la restricción de caudales de 45 m³/s, además de la restricción de 88.00 m³/s, mencionado en el numeral 3.1 anterior. En dicha tabla se observa que, en estas condiciones, el caudal promedio multianual es de 52.41 m³/s, un caudal máximo mensualizado multianual de 88.00 m³/s, un caudal mínimo mensualizado multianual de 11.70 m³/s. Asimismo, estos datos se muestran en la figura 18.

Tabla 5: Descargas Medias Mensuales del río Santa (m³/s)

AÑO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
1978	122.10	223.25	173.92	140.75	113.91	64.14	53.19	42.79	65.88	66.75	100.15	118.44	107.11
1979	125.63	248.51	505.34	231.27	102.07	63.12	51.59	50.62	61.74	73.89	100.83	113.39	144.01
1980	128.77	142.29	129.48	129.98	72.22	64.73	50.68	54.08	72.39	108.73	138.92	238.58	110.90
1981	159.38	477.12	394.02	177.72	86.75	66.86	54.73	47.59	44.42	89.58	171.01	195.03	163.69
1982	175.78	350.23	190.04	192.78	97.74	65.46	48.67	43.04	48.69	107.13	181.83	257.07	146.55
1983	341.40	202.61	386.13	330.63	153.50	89.47	63.77	53.36	53.96	70.48	94.29	176.86	168.06
1984	137.39	711.05	599.96	348.45	171.35	93.50	58.63	45.04	45.14	106.68	78.79	144.01	211.50
1985	142.46	158.51	172.45	174.48	83.50	46.85	35.26	34.40	52.22	53.21	62.73	89.84	92.14
1986	174.28	165.61	198.15	269.23	105.86	54.59	40.77	38.22	39.74	57.01	82.96	131.62	113.17
1987	301.59	292.71	215.41	159.07	113.71	55.17	46.30	41.37	48.88	62.40	114.26	173.58	135.37
1988	254.42	314.40	191.03	243.25	124.02	62.16	46.13	41.39	48.48	61.81	85.66	87.80	130.04
1989	203.24	339.42	345.23	312.69	106.01	61.29	39.68	33.78	37.45	100.53	90.54	67.34	144.78
1990	133.24	131.28	116.60	88.70	52.03	47.96	38.81	38.36	37.77	84.72	143.37	114.36	85.59
1991	120.50	143.84	353.97	134.75	89.98	49.22	38.80	38.56	39.34	54.20	61.61	85.25	100.83
1992	92.15	76.18	131.18	108.77	59.13	38.50	30.50	29.69	29.25	48.15	47.57	60.00	62.59
1993	105.06	324.37	740.34	616.43	170.27	62.00	43.61	38.81	57.65	96.20	202.91	275.65	227.81
1994	369.10	471.80	391.21	262.47	50.03	44.92	48.03	40.63	45.47	44.60	70.61	103.15	161.83
1995	141.89	151.91	227.95	230.10	77.82	46.71	38.66	41.12	42.98	47.32	94.79	114.40	104.64
1996	220.00	309.74	357.37	313.31	103.22	54.47	42.66	41.83	41.21	63.55	73.23	69.69	140.86
1997	103.61	192.16	135.59	73.21	57.95	39.40	37.55	37.58	48.52	52.47	112.28	279.13	97.45
1998	390.39	522.25	617.26	342.15	142.20	70.05	52.34	50.44	50.21	97.77	106.32	83.30	210.39
1999	163.15	508.92	315.51	209.69	118.99	63.02	44.98	43.57	55.90	60.17	66.31	148.45	149.89
2000	110.13	332.25	333.38	231.64	145.97	63.31	43.63	43.84	45.52	53.10	61.25	93.73	129.83
2001	367.91	307.28	500.89	227.11	77.96	56.63	47.84	44.47	49.78	57.37	172.96	180.73	174.24
2002	154.35	202.81	383.80	283.62	95.01	55.49	50.97	41.16	41.92	73.75	166.80	185.11	144.55
2003	165.07	221.19	258.16	190.29	85.06	56.34	46.92	44.25	42.52	63.10	60.81	135.42	114.09
2004	104.53	167.17	137.96	123.91	86.44	44.81	36.43	34.90	33.85	61.86	149.15	167.65	95.72
2005	148.38	162.39	294.19	179.15	78.22	54.34	48.30	45.67	47.28	62.57	65.51	115.82	108.50
2006	129.55	221.92	392.90	374.60	96.70	63.91	47.13	43.01	44.36	57.88	88.25	178.69	145.09
2007	218.34	196.79	320.96	330.61	117.02	59.68	46.00	43.38	39.40	64.00	107.78	90.22	136.18
2008	228.98	254.01	280.89	249.11	104.09	62.64	44.07	35.46	39.39	74.78	114.37	93.80	131.80
2009	252.02	417.22	489.16	429.83	155.39	78.33	54.52	50.74	52.32	97.17	145.97	278.63	208.28
2010	232.44	267.92	265.85	171.41	121.54	58.09	48.41	47.53	44.82	53.85	90.39	167.89	130.85
2011	212.41	215.99	208.89	278.63	95.83	51.80	40.89	42.90	39.57	44.20	81.85	183.71	124.72
2012	228.91	321.54	190.41	300.29	131.42	64.05	58.49	44.51	44.90	66.93	157.58	155.54	147.05
2013	189.52	263.31	492.13	237.59	93.24	56.89	46.63	45.33	47.70	99.31	104.16	220.44	158.02
2014	183.34	286.72	486.95	206.52	181.32	64.34	47.76	44.87	48.12	56.57	79.98	158.64	152.09
2015	277.00	246.54	383.08	241.55	158.99	68.01	46.50	46.92	50.23	64.30	86.06	144.77	151.16
2016	241.55	254.19	286.93	188.16	79.62	52.64	42.12	45.46	52.55	55.81	63.03	92.15	121.18
2017	188.73	221.82	465.36	316.28	174.99	80.24	55.92	52.17	52.06	63.63	65.87	123.10	155.01
2018	195.46	163.43	310.10	263.58	120.36	57.35	42.13	38.35	35.78	62.24	122.47	120.12	127.61
2019	166.08	303.38	348.80	222.44	108.21	62.10	47.43	42.72	46.80	56.70	88.06	212.63	142.11
2020	152.26	184.71	175.59	131.66	99.75	49.26	38.19	39.25	34.80	40.86	52.27	180.18	98.23
2021	312.25	199.87	280.04	240.31	108.88	80.80	41.15	38.59	41.80	87.37	112.75	195.38	143.22
2022	120.68	242.02	368.49	254.99	95.95	56.18	39.76	37.82	48.89	54.17	57.96	82.43	123.11
2023	182.71	257.13	499.65	259.62	118.97	56.58	48.94	46.16	46.80	84.54	120.82	350.21	172.68
PROM	192.75	268.91	326.97	239.59	107.33	59.50	46.01	42.74	46.48	63.20	102.11	152.88	137.92
D.S	78.217	120.665	143.876	96.569	33.212	11.089	6.729	5.285	8.139	18.775	38.421	65.557	48.04
Q75 %	134.278	193.313	200.837	178.079	85.482	54.3695	40.9532	38.6453	41.3096	56.0003	71.2603	96.1386	
MAXIMO	390.387	711.045	740.335	616.425	181.315	93.496	63.765	54.079	72.396	106.728	202.907	350.202	
MINIMO	92.148	76.180	116.596	73.213	50.030	38.497	30.504	29.687	29.249	40.857	47.573	60.064	

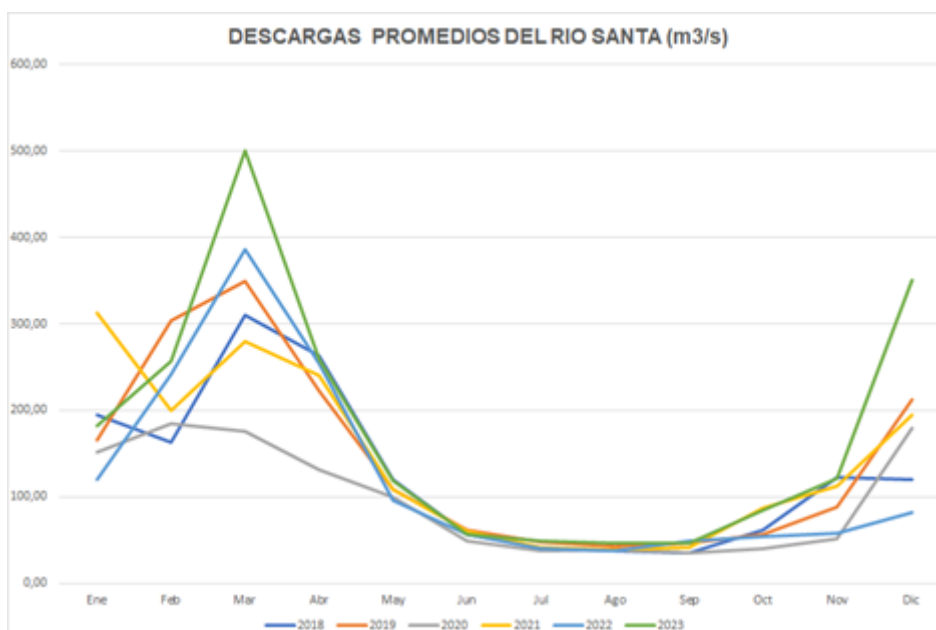


Figura 16: Descargas promedios del río Santa.

Tabla 6: Descargas Medias Mensuales del río Santa para el proyecto Chavimochic con restricción de caudales de 45 m³/s. (m³/s)

ANO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
1978	61.05	111.62	86.96	70.37	56.96	32.07	26.59	21.40	32.94	33.38	50.08	59.22	53.55
1979	62.92	124.25	252.67	115.63	51.04	31.56	25.79	25.31	30.87	36.94	50.41	56.66	72.00
1980	64.38	71.14	64.74	64.99	36.11	32.36	25.34	27.04	36.19	54.36	69.46	119.28	55.45
1981	79.69	238.56	197.01	88.86	43.37	33.43	27.37	23.80	17.77	44.79	85.51	97.51	81.47
1982	87.89	175.11	95.02	96.39	48.87	32.73	24.44	17.22	24.34	53.56	90.92	128.53	72.92
1983	170.70	101.30	193.06	165.42	76.75	44.74	31.88	26.68	26.98	35.23	47.15	88.44	84.03
1984	68.69	355.52	299.98	173.22	85.67	46.75	29.31	22.52	22.57	53.34	39.40	72.01	105.75
1985	71.23	79.25	86.23	87.24	41.75	23.33	14.10	13.76	26.11	26.61	31.36	44.92	45.49
1986	87.14	82.80	99.08	134.62	52.93	27.29	16.31	15.29	15.90	28.50	41.48	65.81	55.60
1987	150.79	146.36	107.71	79.53	56.85	27.59	23.15	16.55	24.44	31.20	57.13	86.79	67.34
1988	127.21	157.20	95.51	121.62	62.01	31.08	23.07	16.56	24.24	30.91	42.83	43.90	64.68
1989	101.62	169.71	172.61	156.34	53.01	30.65	19.94	13.51	14.98	50.26	45.27	33.67	71.80
1990	66.62	65.63	58.30	44.35	26.01	23.98	15.52	15.34	15.11	42.36	71.69	57.15	41.84
1991	60.25	71.92	176.99	67.37	44.99	24.61	15.52	15.42	15.73	27.10	30.80	42.63	49.44
1992	46.07	38.09	65.59	54.38	29.56	15.40	12.20	11.87	11.70	24.07	23.79	30.03	30.23
1993	52.53	162.19	370.17	308.21	85.13	31.00	17.52	15.52	28.82	48.10	101.45	137.93	113.21
1994	184.55	235.90	195.60	131.24	25.02	17.97	24.01	16.25	22.73	17.84	35.30	51.58	79.83
1995	70.94	75.95	113.98	115.05	38.91	23.35	15.46	16.45	17.19	23.66	47.39	57.20	51.30
1996	110.00	154.87	178.69	156.65	51.61	27.24	17.06	16.73	16.48	31.78	36.61	34.85	69.38
1997	51.80	96.08	67.79	36.61	28.97	15.76	15.02	15.03	24.26	26.24	56.14	139.57	47.77
1998	195.19	261.13	308.63	171.07	71.10	35.02	26.17	25.22	25.11	48.89	53.16	41.65	105.20
1999	81.57	254.46	157.75	104.84	59.49	31.51	17.99	17.43	27.95	30.08	33.16	74.22	74.21
2000	55.07	166.13	166.69	115.82	72.99	31.65	17.53	17.54	22.76	26.55	30.62	46.86	64.18
2001	183.96	153.64	250.44	113.56	38.98	28.31	23.92	17.79	24.88	28.69	86.48	90.36	86.75
2002	77.17	101.40	191.90	141.81	47.51	27.75	25.48	16.46	16.77	36.87	83.30	92.56	71.58
2003	82.54	110.59	129.08	95.15	42.53	28.17	23.46	17.70	17.01	31.55	30.40	67.71	56.32
2004	52.27	83.58	68.98	61.95	33.22	17.92	14.57	13.96	13.54	40.93	74.58	83.83	46.61
2005	74.19	81.20	147.09	89.58	39.11	27.17	24.15	22.93	23.64	31.29	32.76	57.91	54.25
2006	64.78	110.96	196.45	187.30	49.35	31.96	23.56	17.20	17.75	28.94	44.13	89.44	71.82
2007	109.17	98.39	160.48	165.30	58.51	29.84	23.00	17.35	15.76	32.00	53.89	45.11	67.40
2008	114.49	127.01	140.45	124.56	52.05	31.32	17.63	14.18	15.76	37.39	57.19	46.90	64.91
2009	126.01	208.61	244.58	214.91	77.69	39.16	27.26	25.37	26.16	48.59	72.99	138.32	104.14
2010	116.22	133.96	132.93	85.70	60.77	29.04	24.21	23.76	17.93	26.92	45.20	83.94	65.05
2011	106.21	107.99	104.44	139.32	47.91	25.90	16.36	17.16	15.83	17.68	40.92	91.86	60.96
2012	114.46	160.77	95.20	150.14	65.71	32.03	29.25	17.81	17.96	33.47	78.79	77.77	72.78
2013	94.76	131.66	246.07	118.80	46.62	28.44	23.31	22.66	23.85	49.66	52.08	110.22	79.01
2014	91.67	143.36	233.47	103.26	90.66	32.17	23.88	17.95	24.06	28.29	39.99	79.32	75.67
2015	138.50	123.27	191.54	120.78	79.50	34.01	23.25	23.46	25.12	32.15	43.04	72.39	75.58
2016	120.78	127.10	143.47	94.08	39.81	26.32	16.85	22.73	26.28	27.91	31.52	46.08	60.24
2017	94.37	110.91	232.68	158.14	87.50	40.12	27.96	26.09	26.03	31.81	32.94	61.55	77.51
2018	97.73	81.71	155.05	131.79	60.18	28.68	16.85	15.34	14.30	31.12	61.24	60.06	62.84
2019	83.04	151.69	174.40	111.22	54.10	31.05	23.71	17.09	23.40	28.35	44.03	106.32	70.70
2020	76.13	92.36	87.80	65.83	49.88	24.63	15.27	15.70	13.92	16.34	26.13	90.09	47.84
2021	156.13	99.94	140.02	120.16	54.34	30.30	16.46	15.44	16.64	43.68	56.37	97.69	70.60
2022	60.34	121.01	193.25	127.50	47.98	28.09	15.91	15.13	24.45	27.08	28.98	41.22	60.91
2023	91.36	128.57	249.83	129.81	59.49	28.29	24.47	23.08	23.40	42.27	60.41	175.10	86.34
PROM.	96.39	134.45	163.49	119.79	53.97	29.39	21.35	18.67	21.51	34.32	51.05	76.44	68.40
D.S	38.109	60.332	71.938	48.285	16.606	6.208	4.995	4.142	5.638	9.837	19.211	32.778	23.54

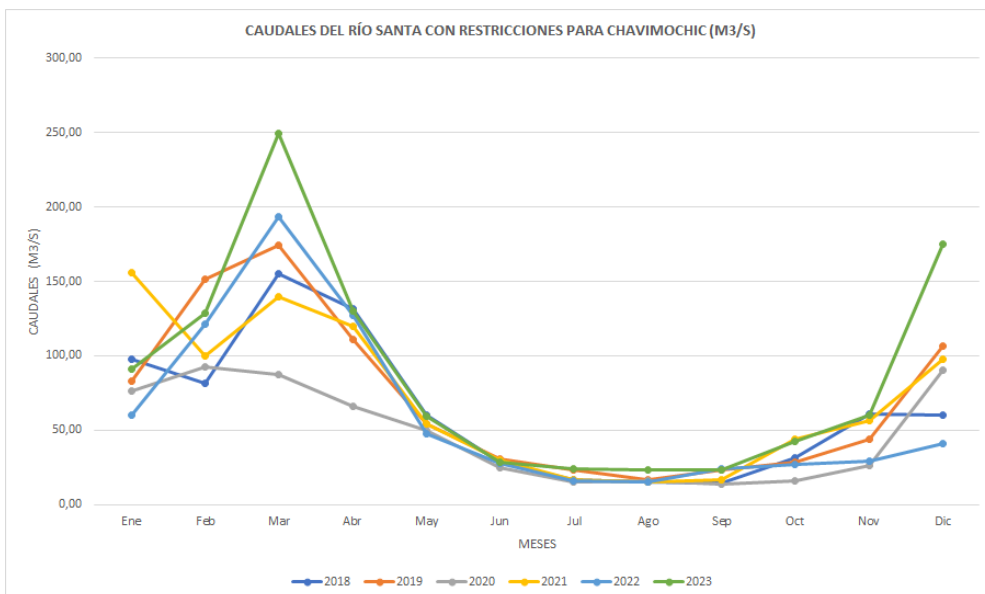


Figura 17: Descargas promedios del río Santa, con restricciones de 45 m³/s

Tabla 7: Descargas Medias Mensuales del río Santa para el proyecto Chavimochic con restricción de caudales de 45 m³/s y la restricción de caudales de 88.0 m³/s.

ANO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
1978	61.05	88.00	86.96	70.37	56.96	32.07	26.59	21.40	32.94	33.38	50.08	59.22	51.58
1979	62.92	88.00	88.00	88.00	51.04	31.56	25.79	25.31	30.87	36.94	50.41	56.66	52.96
1980	64.38	71.14	64.74	64.99	36.11	32.36	25.34	27.04	36.19	54.36	69.46	88.00	52.84
1981	79.69	88.00	88.00	88.00	43.37	33.43	27.37	23.80	17.77	44.79	85.51	88.00	58.98
1982	87.89	88.00	88.00	88.00	48.87	32.73	24.44	17.22	24.34	53.56	88.00	88.00	60.75
1983	88.00	88.00	88.00	88.00	76.75	44.74	31.88	26.68	26.98	35.23	47.15	88.00	60.78
1984	68.69	88.00	88.00	88.00	85.67	46.75	29.31	22.52	22.57	53.34	39.40	72.01	58.69
1985	71.23	79.25	86.23	87.24	41.75	23.33	14.10	13.76	26.11	26.61	31.36	44.92	45.49
1986	87.14	82.80	88.00	88.00	52.93	27.29	16.31	15.29	15.90	28.50	41.48	65.81	50.79
1987	88.00	88.00	88.00	79.53	56.85	27.59	23.15	16.55	24.44	31.20	57.13	86.79	55.60
1988	88.00	88.00	88.00	88.00	62.01	31.08	23.07	16.56	24.24	30.91	42.83	43.90	52.22
1989	88.00	88.00	88.00	88.00	53.01	30.65	19.94	13.51	14.98	50.26	45.27	33.67	51.11
1990	66.62	65.63	58.30	44.35	26.01	23.98	15.52	15.34	15.11	42.36	71.69	57.15	41.84
1991	60.25	71.92	88.00	67.37	44.99	24.61	15.52	15.42	15.73	27.10	30.80	42.63	42.03
1992	46.07	38.09	65.59	54.38	29.56	15.40	12.20	11.87	11.70	24.07	23.79	30.03	30.23
1993	52.53	88.00	88.00	88.00	85.13	31.00	17.52	15.52	28.82	48.10	88.00	88.00	59.89
1994	88.00	88.00	88.00	88.00	25.02	17.97	24.01	16.25	22.73	17.84	35.30	51.58	46.89
1995	70.94	75.95	88.00	88.00	38.91	23.35	15.46	16.45	17.19	23.66	47.39	57.20	46.88
1996	88.00	88.00	88.00	88.00	51.61	27.24	17.06	16.73	16.48	31.78	36.61	34.85	48.70
1997	51.80	88.00	67.79	36.61	28.97	15.76	15.02	15.03	24.26	26.24	56.14	88.00	42.80
1998	88.00	88.00	88.00	88.00	71.10	35.02	26.17	25.22	25.11	48.89	53.16	41.65	56.53
1999	81.57	88.00	88.00	88.00	59.49	31.51	17.99	17.43	27.95	30.08	33.16	74.22	53.12
2000	55.07	88.00	88.00	88.00	72.99	31.65	17.53	17.54	22.76	26.55	30.62	46.86	48.80
2001	88.00	88.00	88.00	88.00	38.98	28.31	23.92	17.79	24.88	28.69	86.48	88.00	57.42
2002	77.17	88.00	88.00	88.00	47.51	27.75	25.48	16.46	16.77	36.87	83.30	88.00	56.94
2003	82.54	88.00	88.00	88.00	42.53	28.17	23.46	17.70	17.01	31.55	30.40	67.71	50.42
2004	52.27	83.58	88.00	61.95	33.22	17.92	14.57	13.96	13.54	40.93	74.58	83.83	48.20
2005	74.19	81.20	88.00	88.00	39.11	27.17	24.15	22.93	23.64	31.29	32.76	57.91	49.19
2006	64.78	88.00	88.00	88.00	49.35	31.96	23.56	17.20	17.75	28.94	44.13	88.00	52.47
2007	88.00	88.00	88.00	88.00	58.51	29.84	23.00	17.35	15.76	32.00	53.89	45.11	52.29
2008	88.00	88.00	88.00	88.00	52.05	31.32	17.63	14.18	15.76	37.39	57.19	46.90	52.03
2009	88.00	88.00	88.00	88.00	77.69	39.16	27.26	25.37	26.16	48.59	72.99	88.00	63.10
2010	88.00	88.00	88.00	85.70	60.77	29.04	24.21	23.76	17.93	26.92	45.20	83.94	55.12
2011	88.00	88.00	88.00	88.00	47.91	25.90	16.36	17.16	15.83	17.68	40.92	88.00	51.81
2012	88.00	88.00	88.00	88.00	65.71	32.03	29.25	17.81	17.96	33.47	78.79	77.77	58.73
2013	88.00	88.00	88.00	88.00	46.62	28.44	23.31	22.66	23.85	49.66	52.08	88.00	57.22
2014	88.00	88.00	88.00	88.00	90.66	32.17	23.88	17.95	24.06	28.29	39.99	79.32	57.36
2015	88.00	88.00	88.00	88.00	79.50	34.01	23.25	23.46	25.12	32.15	43.04	72.39	57.08
2016	88.00	88.00	88.00	88.00	39.81	26.32	16.85	22.73	26.28	27.91	31.52	46.08	49.12
2017	88.00	88.00	88.00	88.00	87.50	40.12	27.96	26.09	26.03	31.81	32.94	61.55	57.17
2018	88.00	81.71	88.00	88.00	60.18	28.68	16.85	15.34	14.30	31.12	61.24	60.06	52.79
2019	83.04	88.00	88.00	88.00	54.10	31.05	23.71	17.09	23.40	28.35	44.03	88.00	54.73
2020	76.13	88.00	87.80	65.83	49.88	24.63	15.27	15.70	13.92	16.34	26.13	88.00	47.30
2021	88.00	88.00	88.00	88.00	54.34	30.30	16.46	15.44	16.64	43.68	56.37	88.00	56.10
2022	60.34	88.00	88.00	88.00	47.98	28.09	15.91	15.13	24.45	27.08	28.98	41.22	46.10
2023	88.00	88.00	88.00	88.00	59.49	28.29	24.47	23.08	23.40	42.27	60.41	88.00	58.45
PROM.	77.70	84.77	85.86	82.57	53.97	29.39	21.35	18.67	21.51	34.32	50.70	68.06	52.41
D.S	13.177	8.702	6.875	12.324	16.606	6.208	4.995	4.142	5.638	9.837	18.380	19.585	10.54

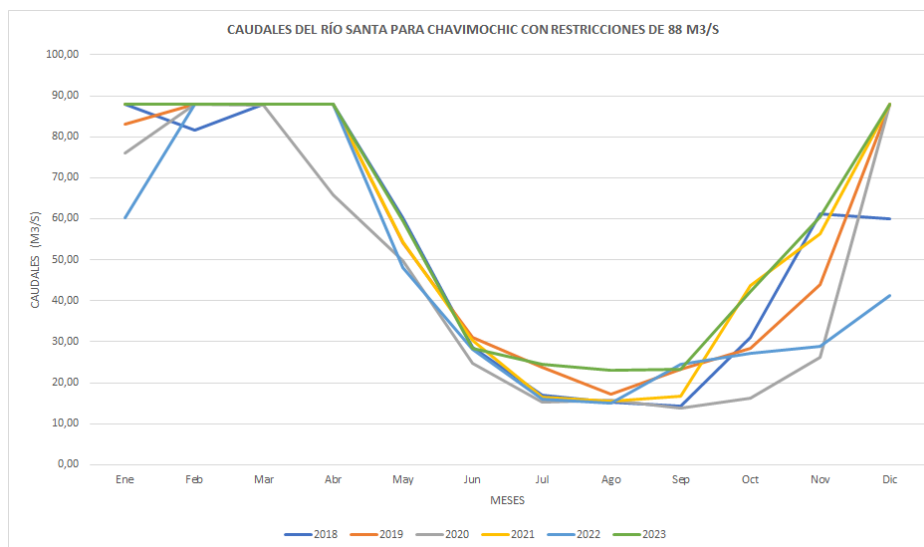


Figura 18: Descargas promedios del río Santa, con restricciones de 45 m³/s y 88 m³/s

3.1.2 Cálculo de las persistencias de caudales de las aguas derivables al proyecto Chavimochic

Se ha calculado el cuadro de persistencias, considerando las descargas Medias Mensuales del río Santa para el proyecto Chavimochic con restricción de caudales de $45 \text{ m}^3/\text{s}$ y la restricción de caudales de $88.0 \text{ m}^3/\text{s}$, cuyos resultados se muestran en la tabla 8; en la tabla 9 y en la figura 19.

Este cálculo es importante porque los valores de la persistencia al 50%, servirán para: i) regular el embalse; ii) calcular la potencia media de la central hidroeléctrica a pie de presa; iii) calcular la energía generada durante su periodo de operación.

Tabla 8: Cuadro de persistencias considerando las descargas Medias Mensuales del río Santa para el proyecto Chavimochic con restricción de caudales de 45 m³/s y la restricción de caudales de 88.0 m³/s. (m³/s)

CAUDAL DE 45 M3/S Y DEL CAUDAL DE 88 M3/S														
ANO	PERSISTENCIA	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Prom.
1	0,02	88,00	88,00	88,00	88,00	90,66	46,75	31,88	27,04	36,19	54,36	88,00	88,00	67,91
2	0,04	88,00	88,00	88,00	88,00	87,50	44,74	29,31	26,68	32,94	53,56	88,00	88,00	66,89
3	0,07	88,00	88,00	88,00	88,00	85,67	40,12	29,25	26,09	30,87	53,34	86,48	88,00	65,98
4	0,09	88,00	88,00	88,00	88,00	85,13	39,16	27,96	25,37	28,82	50,26	85,51	88,00	65,19
5	0,11	88,00	88,00	88,00	88,00	79,50	35,02	27,37	25,31	27,95	49,66	83,30	88,00	64,01
6	0,13	88,00	88,00	88,00	88,00	77,69	34,01	27,26	25,22	26,98	48,89	78,79	88,00	63,24
7	0,15	88,00	88,00	88,00	88,00	76,75	33,43	26,59	23,80	26,28	48,59	74,58	88,00	62,50
8	0,17	88,00	88,00	88,00	88,00	72,99	32,73	26,17	23,76	26,16	48,10	72,99	88,00	61,91
9	0,20	88,00	88,00	88,00	88,00	71,10	32,36	25,79	23,46	26,11	44,79	71,69	88,00	61,28
10	0,22	88,00	88,00	88,00	88,00	65,71	32,17	25,48	23,08	26,03	43,68	69,46	88,00	60,47
11	0,24	88,00	88,00	88,00	88,00	62,01	32,07	25,34	22,93	25,12	42,36	61,24	88,00	59,25
12	0,26	88,00	88,00	88,00	88,00	60,77	32,03	24,47	22,73	25,11	42,27	60,41	88,00	58,98
13	0,28	88,00	88,00	88,00	88,00	60,18	31,96	24,44	22,66	24,88	40,93	57,19	88,00	58,52
14	0,30	88,00	88,00	88,00	88,00	59,49	31,65	24,21	22,52	24,45	37,39	57,13	88,00	58,07
15	0,33	88,00	88,00	88,00	88,00	59,49	31,56	24,15	21,40	24,44	36,94	56,37	88,00	57,86
16	0,35	88,00	88,00	88,00	88,00	58,51	31,51	24,01	17,95	24,34	36,87	56,14	88,00	57,44
17	0,37	88,00	88,00	88,00	88,00	56,96	31,32	23,92	17,81	24,26	35,23	53,89	86,79	56,85
18	0,39	88,00	88,00	88,00	88,00	56,85	31,08	23,88	17,79	24,24	33,47	53,16	83,94	56,37
19	0,41	88,00	88,00	88,00	88,00	54,34	31,05	23,71	17,70	24,06	33,38	52,08	83,83	56,01
20	0,43	88,00	88,00	88,00	88,00	54,10	31,00	23,56	17,54	23,85	32,15	50,41	79,32	55,33
21	0,46	88,00	88,00	88,00	88,00	53,01	30,65	23,46	17,43	23,64	32,00	50,08	77,77	55,00
22	0,48	88,00	88,00	88,00	88,00	52,93	30,30	23,31	17,35	23,40	31,81	47,39	74,22	54,39
23	0,50	87,89	88,00	88,00	88,00	52,05	29,84	23,25	17,22	23,40	31,78	47,15	72,39	54,08
24	0,52	87,14	88,00	88,00	88,00	51,61	29,04	23,15	17,20	22,76	31,55	45,27	72,01	53,64
25	0,54	83,04	88,00	88,00	88,00	51,04	28,68	23,07	17,16	22,73	31,29	45,20	67,71	52,83
26	0,57	82,54	88,00	88,00	88,00	49,88	28,44	23,00	17,09	22,57	31,20	44,13	65,81	52,39
27	0,59	81,57	88,00	88,00	88,00	49,35	28,31	19,94	16,73	17,96	31,12	44,03	61,55	51,21
28	0,61	79,69	88,00	88,00	88,00	48,87	28,29	17,99	16,55	17,93	30,91	43,04	60,06	50,61
29	0,63	77,17	88,00	88,00	88,00	47,98	28,17	17,63	16,56	17,77	30,08	42,83	59,22	50,12
30	0,65	76,13	88,00	88,00	88,00	47,91	28,09	17,53	16,46	17,75	28,94	41,48	57,91	49,68
31	0,67	74,19	88,00	88,00	88,00	47,51	27,75	17,52	16,45	17,19	28,69	40,92	57,20	49,28
32	0,70	71,23	88,00	88,00	88,00	46,62	27,59	17,06	16,25	17,01	28,50	39,99	57,15	48,78
33	0,72	70,94	88,00	88,00	88,00	44,99	27,29	16,85	15,70	16,77	28,35	39,40	56,66	48,41
34	0,74	68,69	88,00	88,00	88,00	43,37	27,24	16,85	15,52	16,64	28,29	36,61	51,58	47,40
35	0,76	66,62	88,00	88,00	88,00	42,53	27,17	16,46	15,44	16,48	27,91	35,30	46,90	46,57
36	0,78	64,78	88,00	88,00	87,24	41,75	26,32	16,36	15,42	15,90	27,10	33,16	46,86	45,91
37	0,80	64,38	83,58	88,00	85,70	39,81	25,90	16,31	15,34	15,83	27,08	32,94	46,08	45,08
38	0,83	62,92	82,80	88,00	79,53	39,11	24,63	15,91	15,34	15,76	26,92	32,76	45,11	44,07
39	0,85	61,05	81,71	88,00	70,37	38,98	24,61	15,52	15,29	15,76	26,61	31,52	44,92	42,86
40	0,87	60,34	81,20	87,80	67,37	38,91	23,98	15,52	15,13	15,73	26,55	31,36	43,90	42,32
41	0,89	60,25	79,25	86,96	65,83	36,11	23,35	15,46	15,03	15,11	26,24	30,80	42,63	41,42
42	0,91	55,07	75,95	86,23	64,99	33,22	23,33	15,27	14,18	14,98	24,07	30,62	41,65	39,96
43	0,93	52,53	71,92	67,79	61,95	29,56	17,97	15,02	13,96	14,30	23,66	30,40	41,22	36,69
44	0,96	52,27	71,14	65,59	54,38	28,97	17,92	14,57	13,76	13,92	17,84	28,98	34,85	34,52
45	0,98	51,80	65,63	64,74	44,35	26,01	15,76	14,10	13,51	13,54	17,68	26,13	33,67	32,24
46	1,00	46,07	38,09	58,30	36,61	25,02	15,40	12,20	11,87	11,70	16,34	23,79	30,03	27,12
PROM.		77,70	84,77	85,86	82,57	53,97	29,39	21,35	18,67	21,51	34,32	50,70	68,06	52,41
D.S		13,177	8,702	6,875	12,324	16,606	6,208	4,995	4,142	5,638	9,837	18,380	19,585	10,54
Q50%		87,889	88,000	88,000	88,000	52,046	29,842	23,251	17,216	23,399	31,777	47,147	72,387	54,08
Q75%		67,656	88,000	88,000	88,000	42,952	27,202	16,654	15,480	16,563	28,095	35,958	49,239	46,98
MAXIMO		88,000	88,000	88,000	88,000	90,658	46,748	31,883	27,040	36,193	54,364	88,000	88,000	67,91
MINIMO		46,074	38,090	58,298	36,607	25,015	15,399	12,202	11,875	11,700	16,343	23,787	30,032	27,12
		77,70	84,77	85,86	82,57	53,97	29,39	21,35	18,67	21,51	34,32	50,70	68,06	
		208,12	205,07	229,96	214,03	144,55	76,17	57,18	50,00	55,76	91,92	131,41	182,30	1.646,46
		67,656	88,000	88,000	88,000	42,952	27,202	16,654	15,480	16,563	28,095	35,958	49,239	
		181,21	235,70	235,70	235,70	115,04	72,86	44,61	41,46	44,36	75,25	96,31	131,88	1.510,07

Tabla 9: Cuadro de persistencias al 50%

MESES (CAUDALES AL 50% DE PERSISTENCIA). M ³ /s											
ENERO	FEB	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGS	SEPT	OCT	NOV	DIC
87.89	88	88	88	52.05	29.84	23.25	17.22	23.40	31.78	47.15	72.39

Estos valores serán empleados para la regulación del embalse y la determinación de la potencia instalada de la central hidroeléctrica a pie de presa, los que son mostrados gráficamente en la figura 19.

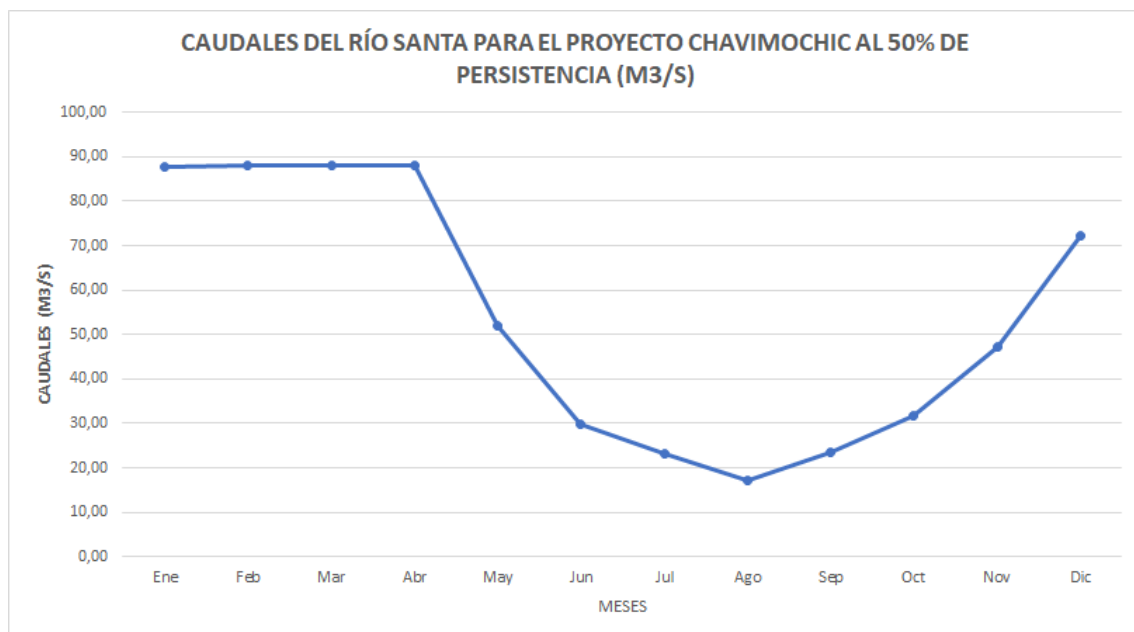


Figura 19: Caudales del río Santa, con restricciones de caudales de 45 m³/s y de 88 m³/s, así como para una persistencia del 50% de caudales.

3.2 Estudio Sedimentológico

El estudio sedimentológico realizado es un objetivo específico, indicado en el numeral 1.4.2 de la presente tesis, que indica textualmente:

“Realizar el estudio de sedimentos de la masa de agua que ingresa y sale del desarenador, para establecer el comparativo sobre el flujo de sedimentos que ingresan al embalse Palo Redondo, considerando los dos escenarios propuestos en esta investigación”

Este estudio nos permite conocer los valores del volumen de sedimentación que forman parte del flujo de la masa de agua del río Santa que ingresa al desarenador del proyecto Chavimochic. Estos valores nos servirán para:

- a) Determinar la velocidad con que ingresan los sedimentos a la zona del embalse, tanto en el escenario donde se emplean floculantes y donde no se emplean estos.
- b) Medir el volumen de sedimentos a lo largo de la vida útil del embalse y su impacto en la reducción del volumen útil de esta estructura.
- c) Con estos insumos, implementar los cálculos señalados en los dos escenarios que se desarrollan en los numerales 3.2.2 y 3.2.3 de la presente tesis.

3.2.1 Premisas para realizar el estudio sedimentológico

- a) Este estudio se ha realizado empleando información secundaria de: i) toma de muestras tomadas en el desarenador, y, ii) de los resultados de laboratorio que hasta la fecha se realizan en el proyecto especial Chavimochic.
- b) Los resultados muestran en el escenario donde se emplea aditivos, la velocidad de sedimentación al ingreso del desarenador, y, corresponde a ensayos realizados en los años 2004 (marzo, abril, mayo, junio) y 2005 (enero a junio).
- c) En el escenario donde no se emplea aditivos al ingreso del desarenador se ha tomado en cuenta registros hasta el año 2022.
- d) El laboratorio sedimentológico del Proyecto Especial Chavimochic (campamento San José) dispone del equipo necesario para el monitoreo de caudales (m^3/s) y concentraciones de sólidos en suspensión (gr/l) del ingreso y salida del desarenador, que son los principales puntos de control. Para efectuar los cálculos respectivos se tiene información desde 2000 - 2022. Algunos años han sido descartados por errores en la cadena de monitoreo y cálculos correspondientes.
- e) Se ha considerado una eficiencia de retención de la Presa Palo Redondo del 85%.

- f) Para determinar las densidades del Volumen Muerto en la presa, en un horizonte de 100 años, se ha seguido la Metodología de la Bureau of Reclamation (Design of Small Dams – Appendix A: Reservoir Sedimentation).
- g) Los caudales de alimentación (Ingreso) al embalse Palo Redondo, está en función de la oferta hídrica del río Santa. Asimismo, el suministro de agua a los terrenos agrícolas considerados como parte del proyecto Chavimochic, en su tercera etapa (empleando el túnel de restitución (Salida)), está en función al Plan de Cultivo para las áreas nuevas y las licencias y permisos vigentes, para las áreas agrícolas existentes, para un periodo de 100 años.

3.2.2 Resultados del estudio de sedimentación sin floculantes (Primer escenario)

El objetivo del estudio es determinar el volumen muerto de la presa Palo Redondo, en 10, 25, 50, 75 y 100 años, teniendo en cuenta el funcionamiento hidráulico y eficiencia del desarenador. Se consideran eficiencias de retención promedio de la presa en (40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90% y 95%).

3.2.2.1 Cálculo de la función de la velocidad de sedimentación sin floculantes

Se ha empleado la metodología adoptada por el Bureau of Reclamation (Design of Small Dams – Appendix A: Reservoir Sedimentation). El resultado se muestra en la figura 20.

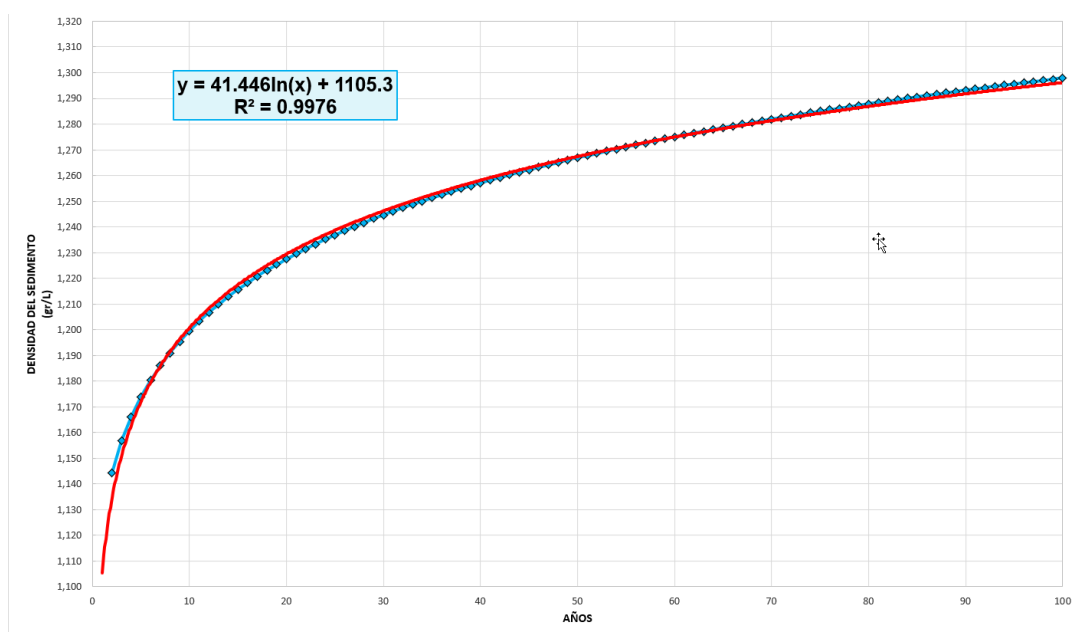


Figura 20: Curva de densidad del sedimento. Periodo (0 – 100) años – Sin aditivo

La ecuación para un periodo de 100 años es la siguiente:

$$y(\text{densidad}) = 41.446 \ln(t) + 1105.3 \quad (R^2 = 0.9976)$$

para un tiempo de 100 años se tendrá una densidad de 1,266.90 gr/l.

3.2.2.2 Determinación del volumen muerto en función al tiempo de operación, densidades del sedimento y eficiencias de retención - floculante

En la tabla 10 que se presenta a continuación, se muestran los resultados de los volúmenes de sedimentos que se depositarían en el embalse Palo Redondo, para diferentes periodos de funcionamiento de esta estructura (100, 85, 75, 50, 25 y 10 años), para diferentes densidades promedios y para diferentes eficiencias de retención del embalse.

Tabla 10: Volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador; densidad del material y años de operación del embalse.

Años	100	85	75	50	25	10
Densidad	1,297.93	1,290.58	1,284.96	1,266.90	1,236.86	1,199.49
Efic. Ret. (%)	Volumen de sedimentos (hm ³)					
40	35.04	30.88	28.12	21.13	14.02	9.43
45	38.62	33.94	30.83	22.97	14.97	9.81
50	42.20	37.00	33.55	24.81	15.93	10.19
55	45.78	40.06	36.26	26.65	16.88	10.57
60	49.36	43.12	38.98	28.49	17.83	10.95
65	52.94	46.18	41.69	30.33	18.79	11.33
70	56.52	49.24	44.41	32.17	19.74	11.71
75	60.10	52.10	47.12	34.01	20.69	12.08
80	63.68	55.36	49.84	35.86	21.64	12.46
85	67.26	58.42	52.55	37.70	22.60	12.84
90	70.84	61.48	55.27	39.54	23.55	13.22
95	74.42	64.54	57.98	41.38	24.50	13.60

Del cuadro anterior se determina que, para un periodo de operación de 50 años, con una densidad promedio de 1,266.90 l/s y una eficiencia de retención de la presa del orden del 85%; el volumen muerto sería de 37.70 Hm³.

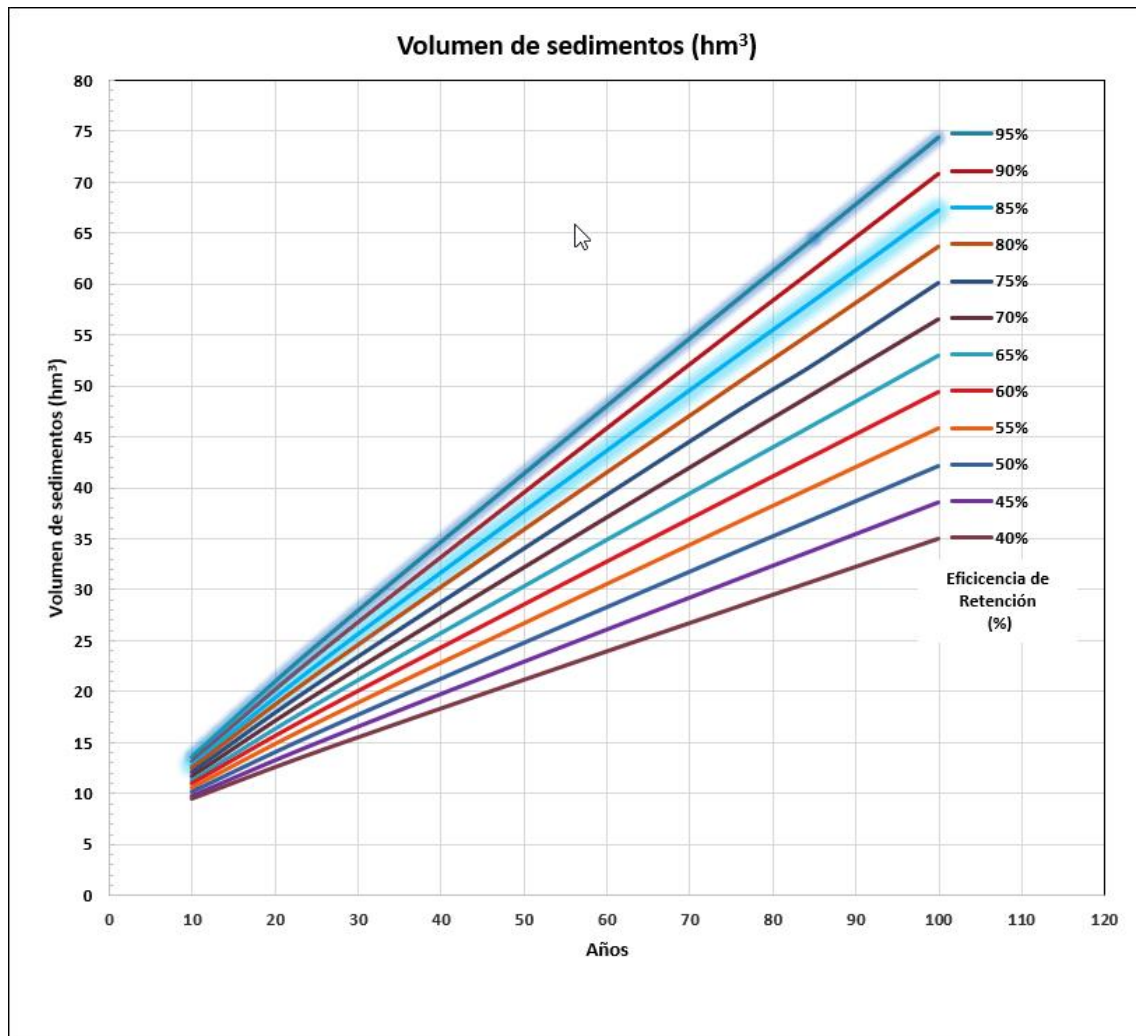


Figura 21: Lamina donde se muestra el volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador; densidad del material y años de operación del embalse.

Asimismo, de la tabla 10 anterior, para una eficiencia de retención del 85%, y un tiempo de 50 años (37.70 hm³), 75 años (52.55 hm³) y 100 años (67.26 hm³).

Tabla 11: Volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador al 85%, 90% y 95%; densidad del material y años de operación del embalse

Años	100	85	75	50	25	10
Densidad	1,297.93	1,290.58	1,284.96	1,266.90	1,236.86	1,199.49
Efic. Ret. (%)	Volumen de sedimentos (hm ³)					
	V = 401 hm ³ (Volumen de diseño de la presa Palo Redondo)					
85%	16.77	14.57	13.10	9.40	5.64	3.20
90%	17.67	15.33	13.78	9.86	5.87	3.30
95%	18.56	16.09	14.46	10.32	6.11	3.39

De la tabla 11 anterior, se puede indicar, para una eficiencia de retención al 85% en los 10 primeros años de funcionamiento se tendría 3.20% (12.84 hm³) de sedimentos del volumen total de la presa. A los 100 años el 16.77% (67.26 hm³) del volumen total de la presa. $(67.26/401 \times 100 = 16.77)$ y así sucesivamente.

3.2.3 Resultados del estudio de sedimentación con floculantes (Segundo escenario)

El objetivo del estudio es determinar el volumen muerto de la presa Palo Redondo, en 10, 25, 50, 75 y 100 años, teniendo en cuenta el funcionamiento hidráulico y eficiencia del desarenador. Se consideran eficiencias de retención promedio de la presa en (40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90% y 95%).

3.2.4 Cálculo de la función de la velocidad de sedimentación con floculantes

Se ha empleado la metodología adoptada por Bureau of Reclamation (Design of Small Dams – Appendix A: Reservoir Sedimentation). El resultado de la determinación de esta función se muestra en la figura 22.

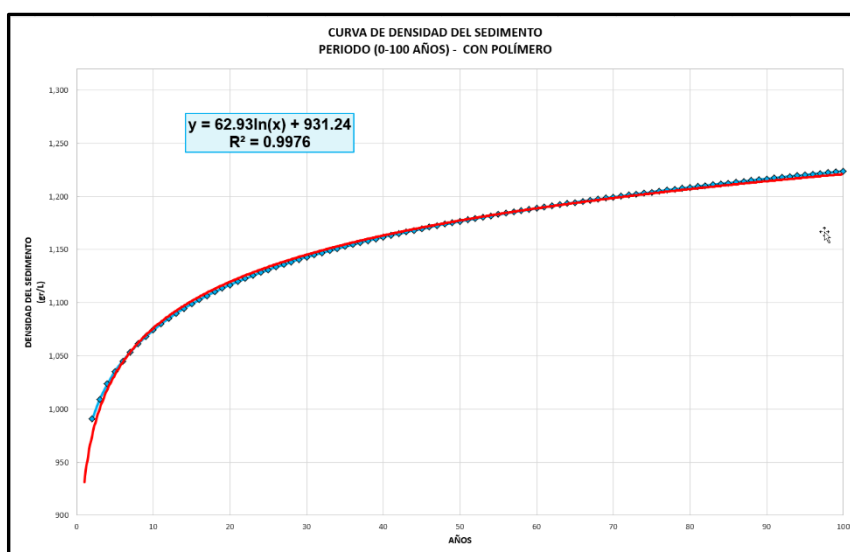


Figura 22: Curva de densidad del sedimento. Periodo (0 – 100) años – Con aditivo

La ecuación para un periodo de 100 años es la siguiente:

$$y(\text{densidad}) = 62.93 \ln(t) + 931.24 \quad (R^2 = 0.9976)$$

para un tiempo de 100 años se tendrá una densidad de 1,223.77 gr/l.

3.2.4.1 Determinación del volumen muerto en función al tiempo de operación, densidades del sedimento y eficiencias de retención – floculante

En la tabla 12 que se presenta a continuación, se muestran los resultados de los volúmenes de sedimentos que se depositarían en el embalse Palo Redondo, para diferentes periodos de funcionamiento de esta estructura (100, 85, 75, 50, 25 y 10 años), para diferentes densidades promedios y para diferentes eficiencias de retención del embalse.

Tabla 12: Volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador; densidad del material y años de operación del embalse.

Años	100	85	75	50	25	10
Densidad	1,223.77	1,212.63	1,204.08	1,176.66	1,131.05	1,074.32
Efic. Ret. (%)	Volumen de sedimentos (hm ³)					
40	22.98	20.61	19.04	15.04	10.95	8.25
45	25.05	22.39	20.62	16.13	11.51	8.48
50	27.12	24.17	22.20	17.21	12.08	8.71

55	29.19	25.94	23.78	18.29	12.65	8.94
60	31.26	27.72	25.36	19.37	13.22	9.18
65	33.34	29.50	26.94	20.45	13.79	9.41
70	35.41	31.27	28.52	21.53	14.35	9.64
75	37.48	33.05	30.10	22.61	14.92	9.87
80	39.55	34.83	31.68	23.69	15.49	10.10
85	41.62	36.60	33.26	24.77	16.06	10.33
90	43.70	38.38	34.84	25.85	16.63	10.56
95	45.77	40.16	36.42	26.93	17.19	10.80

De la tabla 12 anterior se determina que, para un periodo de operación de 50 años, con una densidad promedio de 1,176.66 l/s y una eficiencia de retención de la presa del orden del 85%; el volumen muerto sería de 24.77 Hm³.

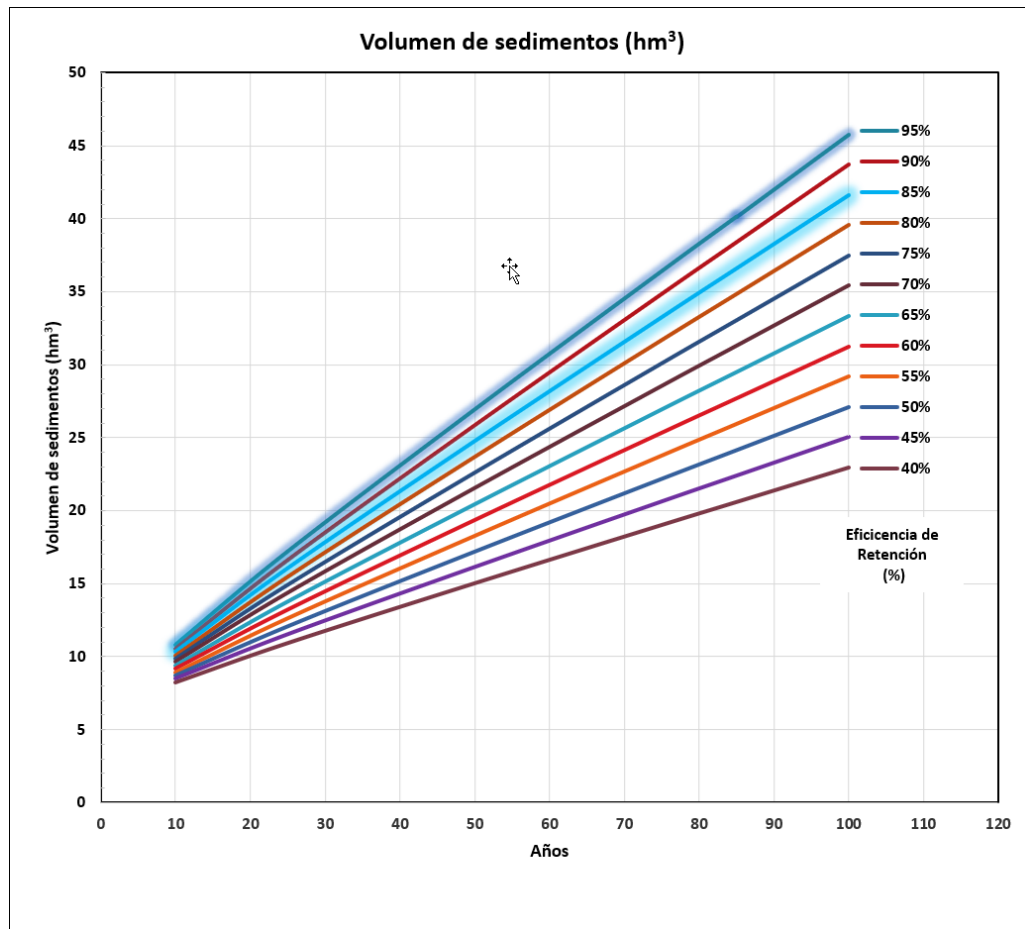


Figura 23: Figura donde se muestra el volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador; densidad del material y años de operación del embalse.

Asimismo, de la tabla anterior, para una eficiencia de retención del 85%, y un tiempo de 50 años (24.77 hm^3), 75 años (33.26 hm^3) y 100 años (41.62 hm^3).

Tabla 13: Volumen de sedimentos en base a la eficiencia de retención del desarenador al 85%, 90% y 95%; densidad del material y años de operación del embalse

Años	100	85	75	50	25	10
Densidad	1,223.77	1,212.63	1,204.08	1,176.66	1,131.05	1,074.32
Efic. Ret. (%)	Volumen de sedimentos (hm^3)					
	$V = 401 \text{ hm}^3$					
85%	10.38%	9.13%	8.29%	6.18%	4.00%	2.58%
90%	10.90%	9.57%	8.69%	6.45%	4.15%	2.63%
95%	11.41%	10.01%	9.08%	6.72%	4.29%	2.69%

De la tabla 13 anterior, se puede indicar, para una eficiencia de retención al 85% en los 10 primeros años de funcionamiento se tendrá 2.58% de sedimentos del volumen total de la presa. A los 100 años el 10.38% del volumen total de la presa.

Para una eficiencia de retención al 95%; en los 10 primeros años se tendría un 2.69%, 50 años (6.72%) y 100 años (11.41%)

Esta proyección es válida, siempre y cuando el desarenador tenga buena eficiencia; excelente control en el manejo de los sedimentos; para lo cual, es recomendable automatizar todos los parámetros de control para una mejor gestión de sedimentos en el desarenador y la presa Palo Redondo.

3.3 Estudio de Regulación del embalse

El estudio de regulación del embalse realizado es un objetivo específico, indicado en el numeral 1.4.2 de la presente tesis, que indica textualmente:

“Realizar el estudio de regulación del embalse Palo Redondo”

A continuación, en la Tabla 14, se presentan los resultados de la regulación del embalse para el inicio de operación de la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic, considerando los caudales promedios mensualizados multianual al 50% de persistencia.

Para realizar la regulación del embalse es necesario se tenga en consideración las siguientes premisas:

- a) El volumen inicial del embalse en el mes de enero debe ser del 50% del volumen útil total.
- b) Se debe considerar las pérdidas por evaporación e infiltración en el embalse en forma mensual
- c) Considerar el caudal ecológico en todos los meses

- d) Considerar la demanda agrícola mensualizada
- e) El volumen de agua final del embalse en cada mes no debe ser mayor al volumen útil total del embalse.
- f) El volumen al final del mes de diciembre debe ser del orden del 50% del volumen útil total.

Tabla 14: Cuadro de regulación del embalse al 50% de persistencia y al inicio de operación

REGULACION DEL EMBALSE												
CENTRAL HIDROELECTRICA A PIE DE PRESA DE CHAVIMOCHIC AL 50% DE PERSISTENCIA. AL INICIO DE OPERACIÓN												
DESCRIPCION	MESES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
CAUDALES NATURALES DE INGRESO AL 50% DE PERSISTENCIA	87,89	88,00	88,00	88,00	52,05	29,84	23,25	17,22	23,40	31,78	47,15	72,39
DÍAS DEL MES	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
VOLUMENES NATURALES DE INGRESO AL EMBALSE PALO REDONDO Hm ³	235,40	212,89	235,70	228,10	139,40	77,35	62,28	46,11	60,65	85,11	122,20	193,88
VOLUMEN INICIAL	182,50	250,23	365,00	365,00	365,00	365,00	351,91	338,60	288,95	234,34	184,50	157,77
VOLUMEN DE INGRESO	235,40	212,89	235,70	228,10	139,40	77,35	62,28	46,11	60,65	85,11	122,20	193,88
VOLUMEN INICIAL + VOLUMEN DE INGRESO Hm ³	417,90	463,12	600,70	593,10	504,40	442,35	414,19	384,71	349,60	319,45	306,70	351,7
PERDIDAS POR EVAPORACIÓN - INFILTRACIÓN Y CAUDAL ECOLÓGICO Hm ³ .	0,87	0,79	0,88	0,85	0,52	0,29	0,23	0,17	0,23	0,32	0,45	0,72
DEMANDA (100%) Hm ³	188,68	141,29	119,81	116,00	117,08	101,98	85,25	108,13	130,13	152,30	167,96	190,41
DEMANDA (88%) Hm ³	166,79	124,90	105,91	102,54	103,50	90,15	75,36	95,59	115,03	134,63	148,48	168,32
VOLUMEN FINAL EN EL EMBALSE Hm ³	250,23	365,00	365,00	365,00	365,00	351,91	338,60	288,95	234,34	184,50	157,77	182,61

3.4 Estudio hidráulico

El estudio hidráulico realizado es un objetivo específico, indicado en el numeral 1.4.2 de la presente tesis, que indica textualmente:

“Elaborar el estudio hidráulico referido al cálculo de las pérdidas de carga por fricción y las pérdidas de carga secundarias”

Está relacionado con los cálculos de pérdida de carga por fricción y secundarias del tramo comprendido entre el túnel de toma y el eje de turbinas.

Las figuras 24 y 25 que se muestran a continuación es el sistema hidráulico, sobre el cual se calculará las pérdidas anteriormente indicadas.

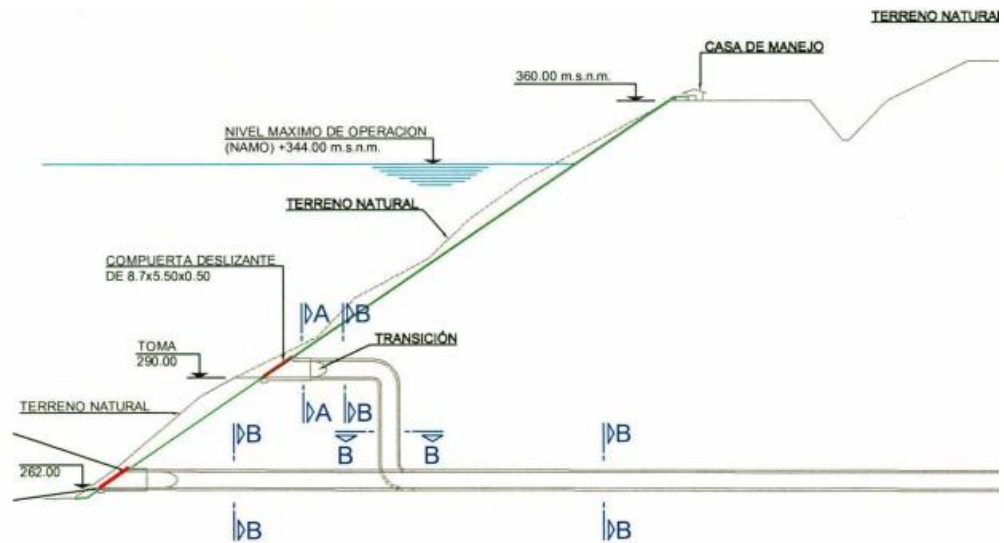


Figura 24: Corte longitudinal del embalse cota NAMO y túnel de toma
Fuente: Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa (Proyecto Chavimochic, 2013)

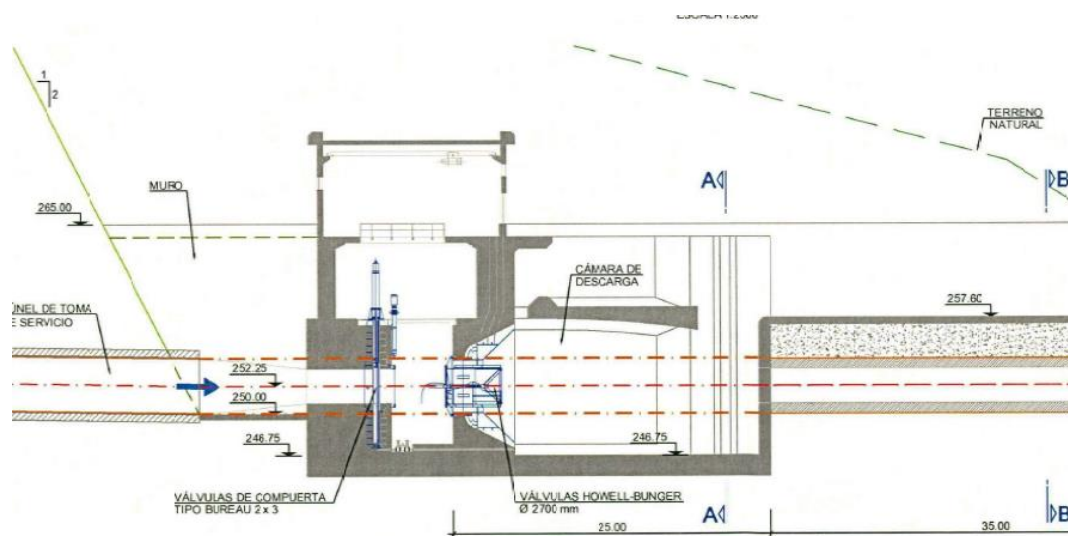


Figura 25: Corte longitudinal de la casa de máquinas. Eje de turbinas
Fuente: Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa (Proyecto Chavimochic, 2013)

3.4.1 Pérdidas por fricción

Se utiliza la ecuación de Manning que se muestra a continuación:

$$Q = \frac{AR^{2/3}S^{1/2}}{n}$$

Donde:

Q = Caudal en m³/s

A = Área del ducto en m²

R = Radio medio hidráulico en m

S = Pendiente

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

Además:

$$S = H_f/L$$

Donde:

H_f = Pérdidas de carga por fricción en m

L = Longitud del ducto en m

De la figura 24 y 25 anteriores se determina los siguientes datos:

$$L = 800 \text{ m}$$

$$D = 4.50 \text{ m}$$

Además:

$$Q = 78 \text{ m}^3/\text{s}$$

Que determinan:

$$V = 4.9 \text{ m/s}$$

$$n = 0.010$$

Realizando los cálculos:

$$H_f = 1.64 \text{ m}$$

3.4.2 Pérdidas singulares

Para este sistema hidráulico las pérdidas singulares o secundarias o localizadas son las siguientes:

- Ingreso túnel de toma:
- 2 codos de 90°:
- 1 válvula de compuerta:

Se utiliza la siguiente fórmula:

$$h = k \frac{V^2}{2g}$$

Los valores de k se muestran en la Tabla 15 siguiente.

Tabla 15: Cuadro de valores k

Accesorio	k
Emboque	0.5
Codos	2 (0.6)
Válvula de compuerta	0.2
Total, k	1.9

Realizando los cálculos:

$$H_s = 2.33 \text{ m}$$

Pérdidas totales:

$$H_t = 3.97 \text{ m}$$

3.5 Estudio de la potencia media de la Central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic

El estudio de la potencia media de la Central Hidroeléctrica del proyecto Chavimochic es un objetivo específico, indicado en el numeral 1.4.2 de la presente tesis, que indica textualmente:

“Determinar la potencia media de la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic”

Para la determinación de la potencia media de la central hidroeléctrica, se emplea la siguiente relación:

$$Pe = Ph \times \eta_{tot} / 10^6$$

$$Pe = Ph \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_e / 10^6$$

$$Pe = Q \times h_n \times g \times \gamma \times \eta_t \times \eta_g \times \eta_e / 10^6$$

Donde:

Pe = Potencia eléctrica (Mw)

Ph = Potencia hidráulica (Mw)

η_{tot} = Eficiencia total

η_t = Eficiencia de la turbina

η_g = Eficiencia del generador

η_e = Eficiencia electrónica

Q = Caudal (m^3/s)

h_n = Altura neta (m)

g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)

γ = Densidad del agua (kg/m^3)

Con respecto a la determinación de la altura neta, se ha seguido el siguiente procedimiento:

- a) Determinación de la altura bruta (m) entre el centro de gravedad de la masa de agua del embalse y el eje de las turbinas.
- b) La altura neta será la diferencia entre la altura bruta y las pérdidas de carga por fricción y por pérdidas de carga locales.
- c) Para estos cálculos se emplean las siguientes figuras 26, 27 y 28:

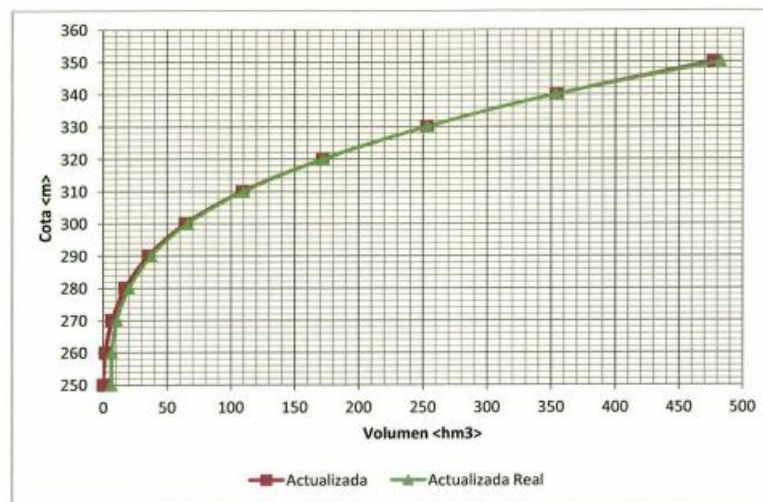


Figura 26: Curva del embalse. Altura vs almacenamiento

Fuente: Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa (Proyecto Chavimochic, 2013)

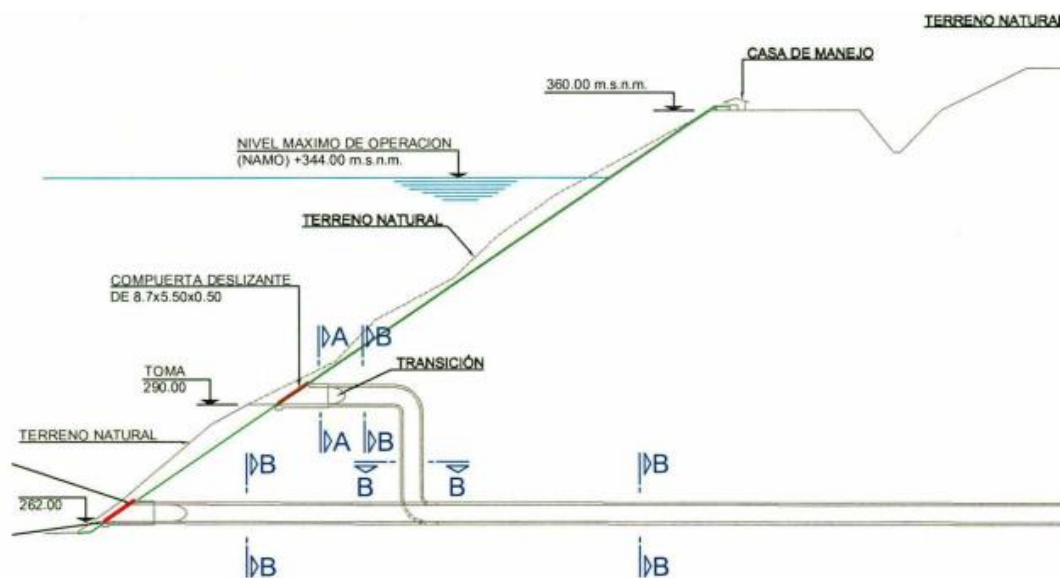


Figura 27: Corte longitudinal del embalse cota NAMO y túnel de toma

Fuente: Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa (Proyecto Chavimochic, 2013)

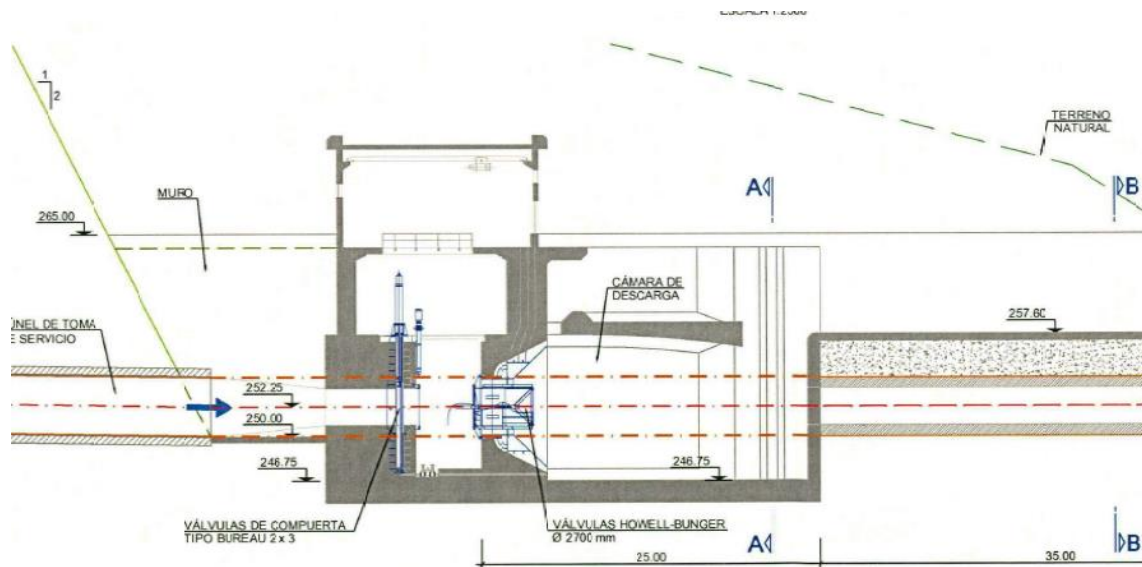


Figura 28: Corte longitudinal de la casa de máquinas. Eje de turbinas
 Fuente: Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa (Proyecto Chavimochic, 2013)

De la aplicación de la fórmula anterior, se determina que la potencia media de la central hidroeléctrica a pie de presa es de 25.16 MW.

3.6 Cálculo de la energía generada optimizada durante la operación de la central hidroeléctrica a pie de presa

El estudio de la energía generada por la Central Hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic es un objetivo específico, indicado en el numeral 1.4.2 de la presente tesis, que indica textualmente:

“Calcular la energía media de la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic y su evolución a lo largo de la vida útil de las obras, considerando las alternativas de solución planteadas en los diferentes escenarios del presente estudio de investigación”

Para calcular el valor de la energía optimizada durante la operación de la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic, se seguirán los siguientes pasos:

- Calcular la energía generada para los periodos de operación siguientes: 50 años, 55 años, 60 años, 65 años, 70 años y 75 años.
- Los cálculos indicados en a) deben incluir el volumen de sedimentos para los escenarios: i) sin polímeros; y, ii) con polímeros.
- Realizar la regulación del embalse para cada periodo de operación, considerando como pérdidas el volumen de sedimentos.
- Cálculo de la energía generada para cada uno de los años mencionados

3.6.1 Cálculo del volumen de sedimentos para diferentes años de operación, considerando los dos escenarios anteriormente indicados.

Se utilizarán los resultados del estudio sedimentológico indicados en el numeral 3.2 de la presente tesis, cuyos resultados se muestran a continuación:

3.6.1.1 Considerando polímeros

En la Tabla 16 se muestran los valores del volumen de sedimentos para el escenario donde se emplea polímeros.

Tabla 16: Cuadro de volumen de sedimentos para el escenario donde se emplea polímeros.

Años	100	85	75	50	25	10	
Densidad	1,223.77	1,212.63	1,204.08	1,176.66	1,131.05	1,074.32	
Efic. Ret. (%)	Volumen de sedimentos (hm ³)						
40	22.98	20.61	19.04	15.04	10.95	8.25	
45	25.05	22.39	20.62	16.13	11.51	8.48	
50	27.12	24.17	22.20	17.21	12.08	8.71	
55	29.19	25.94	23.78	18.29	12.65	8.94	
60	31.26	27.72	25.36	19.37	13.22	9.18	
65	33.34	29.50	26.94	20.45	13.79	9.41	
70	35.41	31.27	28.52	21.53	14.35	9.64	
75	37.48	33.05	30.10	22.61	14.92	9.87	
80	39.55	34.83	31.68	23.69	15.49	10.10	
85	41.62	36.60	33.26	24.77	16.06	10.33	
90	43.70	38.38	34.84	25.85	16.63	10.56	
95	45.77	40.16	36.42	26.93	17.19	10.80	
45 AÑOS	23		50 AÑOS	24.77		70 AÑOS	32
40 AÑOS	22		55 AÑOS	27		75 AÑOS	34
35 AÑOS	19		60 AÑOS	28			
30 AÑOS	18		65 AÑOS	30			

3.6.1.2 Sin considerar polímeros

En la Tabla 17 se muestran los valores del volumen de sedimentos para el escenario donde no se emplea polímeros.

Tabla 17: Cuadro de volumen de sedimentos para el escenario donde no se emplea polímeros.

Años	100	85	75	50	25	10
Densidad	1,297.93	1,290.58	1,284.96	1,266.90	1,236.86	1,199.49
Efic. Ret. (%)	Volumen de sedimentos (hm ³)					
40	35.04	30.88	28.12	21.13	14.02	9.43
45	38.62	33.94	30.83	22.97	14.97	9.81
50	42.20	37.00	33.55	24.81	15.93	10.19
55	45.78	40.06	36.26	26.65	16.88	10.57
60	49.36	43.12	38.98	28.49	17.83	10.95
65	52.94	46.18	41.69	30.33	18.79	11.33
70	56.52	49.24	44.41	32.17	19.74	11.71
75	60.10	52.10	47.12	34.01	20.69	12.08
80	63.68	55.36	49.84	35.86	21.64	12.46
85	67.26	58.42	52.55	37.70	22.60	12.84
90	70.84	61.48	55.27	39.54	23.55	13.22
95	74.42	64.54	57.98	41.38	24.50	13.60
75 AÑOS	53					
70 AÑOS	50					
65 AÑOS	47					
60 AÑOS	44					
55 AÑOS	42					
50 AÑOS	37.7					
45 AÑOS	34					
40 AÑOS	32					
35 AÑOS	28					
30 AÑOS	18					

3.6.2 Cálculo de la energía generada para diferentes años de operación, empleando la correspondiente pérdida de volumen útil del embalse debido a los sedimentos.

Para la determinación de la energía generada de la central hidroeléctrica a pie de presa, se emplea la siguiente relación:

$$Ee = Q \times hn \times g \times \gamma \times \eta t \times \eta g \times \eta e \times t / 10^6$$

Donde:

Ee = Energía eléctrica (Mwh)

η_{tot} = Eficiencia total

η_t = Eficiencia de la turbina

η_g = Eficiencia del generador

η_e = Eficiencia electrónica

- Q = Caudal (m^3/s)
 h_n = Altura neta (m)
 g = Aceleración de la gravedad (m/s^2)
 γ = Densidad del agua (kg/m^3)
 t = Tiempo (horas)

3.6.2.1 Cálculo de la energía generada para 50 años de operación, empleando la correspondiente pérdida de volumen útil del embalse debido a los sedimentos.

Este cálculo se realizará para los dos escenarios: i) cuando en el desarenador se emplea floculadores, y, ii) cuando no se emplean floculadores. El resto de las condiciones son las mismas.

Los cálculos que se presentan líneas abajo se realizan para ambos escenarios, pero para un solo periodo de operación (50 años), resultando que el procedimiento para el resto de los años de operación entre 55 años a 75 años es el mismo.

a) Empleando floculadores

Para el cálculo de la energía generada en el escenario donde se emplean floculadores, se sigue el siguiente procedimiento:

- Se realiza la regulación del embalse de la presa Palo Redondo, incluyendo las pérdidas por sedimentos, además de los conceptos indicados en el numeral 3.3 de la presente tesis.
- El objetivo de esta metodología es en primera instancia, definir el volumen final mensual en cada embalse, que conlleva a la determinación de la energía generada en forma mensual, lo que se muestra en la tabla 18 señalada líneas abajo.
- Para el cálculo de la energía media mensual que se muestra en la tabla 21, se utilizan los resultados mostrados en la tabla 19 (altura bruta) y 20 (Volumen útil del embalse).

Tabla 18: Cuadro de regulación del embalse para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación con floculantes

REGULACION DEL EMBALSE												
CENTRAL HIDROELECTRICA A PIE DE PRESA DE CHAVIMOCHIC AL 50% DE PERSISTENCIA. 50 AÑOS. ALTERNATIVA CON FLOCULADORES												
DESCRIPCION	MESES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
CAUDALES NATURALES DE ING	87,89	88,00	88,00	88,00	52,05	29,84	23,25	17,22	23,40	31,78	47,15	72,39
DÍAS DEL MES	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
VOLUMENES NATURALES DE	235,40	212,89	235,70	228,10	139,40	77,35	62,28	46,11	60,65	85,11	122,20	193,88
VOLUMEN INICIAL	170,12	240,49	329,67	340,00	340,00	340,00	328,34	316,22	268,08	215,29	167,59	143,21
VOLUMEN DE INGRESO	235,40	212,89	235,70	228,10	139,40	77,35	62,28	46,11	60,65	85,11	122,20	193,88
VOLUMEN INICIAL + VOLUMEN	405,52	453,38	565,37	568,10	479,40	417,35	390,62	362,33	328,73	300,40	289,79	337,1
PERDIDAS POR EVAPORACIÓN, FILTRACIÓN Y CAUDAL	0,87	0,79	0,88	0,85	0,52	0,29	0,23	0,17	0,23	0,32	0,45	0,72
PERDIDAS POR SEDIMENTOS H	3,43	0,87	3,44	3,33	2,03	1,13	0,91	0,67	0,88	1,24	1,78	2,83
DEMANDA (100%) Hm ³	188,68	141,29	119,81	116,00	117,08	101,98	85,25	108,13	130,13	152,30	167,96	190,41
DEMANDA (87%) Hm ³	164,15	122,92	104,23	100,92	101,86	88,72	74,17	94,07	113,21	132,50	146,13	165,66
VOLUMEN FINAL EN EL EMBA	240,49	329,67	340,00	340,00	340,00	328,34	316,22	268,08	215,29	167,59	143,21	170,72
CAUDAL A TURBINARSE (m ³ /s)	61,29	50,81	38,92	38,94	38,03	34,23	27,69	35,12	43,68	49,47	56,38	61,85

Tabla 19: Cuadro del cálculo de la altura del embalse en su centro de gravedad para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación con floculantes

Nivel NAMO: 344 msnm		
Nivel NAMINO: 290 msnm		
Nivel del centro de gravedad del embalse: 319,5 msnm	32,00	h entre C.G y nivel de toma
Altura del embalse: $319,5 - 290 = 29,5 \text{ m} + (290 - 262) \text{ m} = 57,5 \text{ m}$	57,50	

Tabla 20: Cuadro de cálculo del nuevo volumen útil del embalse, descontando sedimentos para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación con floculantes

Volumen Inicial del Embalse =	50%	$V_{\text{máx}}$	=	170,115	Hm ³
Volumen útil del Embalse =	340,23	Hm ³			

Tabla 21: Cuadro de cálculo de la energía mensual generada, considerando el nuevo volumen útil del embalse, descontando sedimentos para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación con floculantes

CAUDAL A TURBINARSE (m ³ /s)	49,00	49,00	39,50	39,52	38,60	34,74	28,10	35,65	44,33	49,00	49,00	49,00
ENERGÍA GENERADA MWH	17.913,41	17.913,41	14.439,78	14.446,61	14.110,75	12.700,56	10.274,53	13.032,08	16.206,35	17.913,41	17.913,41	17.913,41

Energía generada: 183,376 MWH

b) Sin el empleo de floculadores

Para el cálculo de la energía generada en el escenario donde no se emplean floculadores, se sigue el siguiente procedimiento:

- Se realiza la regulación del embalse de la presa Palo Redondo, incluyendo las pérdidas por sedimentos, además de los conceptos indicados en el numeral 3.3 de la presente tesis.
- El objetivo de esta metodología es en primera instancia, definir el volumen final mensual en cada embalse, que conlleva a la determinación de la energía generada en forma mensual, lo que se muestra en la tabla 22 señalada líneas abajo.
- Para el cálculo de la energía media mensual que se muestra en la tabla 25, se utilizan los resultados mostrados en la tabla 23 (altura bruta) y Tabla 24 (Volumen útil del embalse).

Tabla 22: Cuadro de regulación del embalse para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación sin floculantes

REGULACION DEL EMBALSE												
CENTRAL HIDROELECTRICA A PIE DE PRESA DE CHAVIMOCHIC AL 50% DE PERSISTENCIA. 50 AÑOS. ALTERNATIVA SIN FLOCULADORES												
DESCRIPCION	MESES											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
CAUDALES NATURALES DE INGRESO	87,89	88,00	88,00	88,00	52,05	29,84	23,25	17,22	23,40	31,78	47,15	72,39
DÍAS DEL MES	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
VOLUMENES NATURALES DE INGRESO	235,40	212,89	235,70	228,10	139,40	77,35	62,28	46,11	60,65	85,11	122,20	193,88
VOLUMEN INICIAL	163,65	235,16	325,18	327,30	327,30	327,30	316,25	304,64	257,15	205,15	158,35	134,99
VOLUMEN DE INGRESO	235,40	212,89	235,70	228,10	139,40	77,35	62,28	46,11	60,65	85,11	122,20	193,88
VOLUMEN INICIAL + VOLUMEN DE INGRESO	399,05	448,05	560,88	555,40	466,70	404,65	378,53	350,75	317,80	290,26	280,56	328,9
PERDIDAS POR EVAPORACIÓN, Hm ³	0,87	0,79	0,88	0,85	0,52	0,29	0,23	0,17	0,23	0,32	0,45	0,72
PERDIDAS POR SEDIMENTOS Hm ³	5,22	0,87	5,23	5,06	3,09	1,72	1,38	1,02	1,35	1,89	2,71	4,30
DEMANDA (100%) Hm ³	188,68	141,29	119,81	116,00	117,08	101,98	85,25	108,13	130,13	152,30	167,96	190,41
DEMANDA (86%) Hm ³	163,02	122,07	103,52	100,22	101,16	88,11	73,66	93,42	112,43	131,59	145,12	164,51
VOLUMEN FINAL EN EL EMBALSE	235,16	325,18	327,30	327,30	327,30	316,25	304,64	257,15	205,15	158,35	134,99	163,63

Tabla 23: Cuadro del cálculo de la altura del embalse en su centro de gravedad para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación sin floculantes

Nivel NAMO: 336 msnm		
Nivel NAMINO: 290 msnm		
Nivel del centro de gravedad del embalse: 318,5 msnm	32,00	C.G y nivel de toma
Altura del embalse: $318,5 - 290 = 28,5 \text{ m} + (290 - 262) \text{ m} = 57 \text{ m}$	56,50	

Volumen Inicial del Embalse	50%	$V_{\text{máx}}$	=	163,65	Hm^3
Volumen útil del Embalse	327,3	Hm^3			

Tabla 25: Cuadro de cálculo de la energía mensual generada, considerando el nuevo volumen útil del embalse, descontando sedimentos para el cálculo de la energía mensual generada con una persistencia al 50% y a los 50 años de operación sin floculantes

CAUDAL A TURBINARSE (m3/s)	49,00	49,00	38,65	38,67	37,77	33,99	27,50	34,88	43,38	49,00	49,00	49,00		
ENERGÍA GENERADA MWH	17.590,64	17.590,64	13.874,49	13.881,05	13.558,34	12.203,36	9.872,30	12.521,90	15.571,91	17.590,64	17.590,64	17.590,64		

Energía generada: 179.437 MWH

3.6.2.2 Cálculo de la energía generada para el periodo entre 55 y 75 años de operación, empleando la correspondiente perdida de volumen útil del embalse debido a los sedimentos.

Este cálculo se realizará empleando el mismo procedimiento del numeral 3.6.2.1 anterior y se mostrarán los valores de la energía para cada escenario, tanto cuando se emplea floculadores y cuando el sistema funciona sin floculadores.

a) Resumen de la energía generada empleando floculadores

La energía generada empleando floculadores se muestra en al Tabla 26.

Tabla 26: Cuadro resumen con los valores de energía generada anual para diferentes años de operación de la central hidroeléctrica, empleando floculadores

AÑO DE OPERACIÓN	ENERGÍA (MWH)
50	183,376
55	181,724
60	178,315
65	176,560
70	176,456
75	174,807

- b) Resumen de la energía generada sin el empleo de floculadores

La energía generada sin emplear floculadores se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27: Cuadro resumen con los valores de energía generada anual para diferentes años de operación de la central hidroeléctrica, sin floculadores

AÑO DE OPERACIÓN	ENERGÍA (MWH)
50	179,437
55	177,581
60	177,476
65	175,625
70	175,322
75	173,560

energía

c) Resumen de la optimizada durante la

operación de la central hidroeléctrica a pie de presa.

La energía total optimizada en el periodo comprendido entre los 50 y 75 años de operación es de 47,942,500 KWH, conforme se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28: Cuadro resumen con el cálculo de la energía optimizada en el periodo de operación de la central hidroeléctrica a pie de presa.

AÑOS	ENERGÍA (KWH)	PROMEDIO (KWH)	ENERGÍA PARA EL PERIODO (KWH)
ENTRE 50 Y 55	3.941,000	4.042,000	20.210,000
ENTRE 55 Y 60	4.143,000	2.491,000	12.455,000
ENTRE 60 Y 65	839,000	887,000	4.435,000
ENTRE 65 Y 70	935,000	1.034,500	5.172,500
ENTRE 70 Y 75	1.134,000	1.134,000	5.670,000
ENTRE 50 Y 55			
ENERGÍA TOTAL OPTIMIZADA (KWH)			47.942,500

CAPITULO IV: DISCUSIÓN

CAPITULO IV: DISCUSIÓN

1. Los escenarios estudiados en la presente tesis, relacionados con el empleo o no de floculadores en el desarenador, como una forma de reducir el volumen de sedimentos que ingresen a la zona del embalse, son algunas alternativas para optimizar la generación de energía en la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic.
2. Otra alternativa que podría implementarse pero que no se ha evaluado en la presente tesis, es construir una estructura aguas abajo del desarenador, donde se realice el tratamiento adicional de la masa de agua, que permita la eliminación de sedimentos.

3. Se ha considerado para las pérdidas por evaporación, infiltración y para el caudal ecológico del proyecto, la información contenida en los estudios previos de la tercera etapa del proyecto Chavimochic. Estos datos han sido empleados para los dos escenarios estudiados y para todos los años de operación de las estructuras; y tiene un valor de $6.31 \text{ Hm}^3/\text{año}$. Esto garantiza que exista un adecuado nivel en la comparación de resultados en ambos escenarios.
4. En el estudio hidráulico, se ha utilizado el concepto de volumen útil promedio, que es el volumen de agua que se encuentra almacenada en el embalse entre la cota promedio del volumen útil y el nivel de toma del embalse. Este volumen varía en función al volumen útil para cada año de operación en cada escenario, el mismo que está relacionado con el volumen de pérdidas por sedimentos.
5. En la regulación del embalse Palo Redondo, se han incluido las pérdidas relacionadas con el volumen de sedimentos en ambos escenarios estudiados, este elemento es fundamental para la optimización de la producción de energía durante el tiempo de operación de la central hidroeléctrica a pie de presa.
6. Para el cálculo de la potencia media de la central hidroeléctrica a pie de presa, se ha empleado como insumos, los resultados hidrológicos, el estudio de sedimentos elaborado para la presente tesis y el resultado de los cálculos hidráulicos.
7. En relación con el tipo y número de las turbinas hidráulicas utilizadas, este tema no se trató en la presente tesis; indicando que las turbinas debido a la altura bruta de la carga de agua. Correspondería una turbina Francis y el número estaría en función básicamente de la viabilidad económica, de la operación de la central hidroeléctrica y del periodo de mantenimiento, etc.
8. En el estudio de la energía optimizada, se han comparado los resultados cuando se estudian los siguientes escenarios: i) empleando floculadores para el tratamiento de la masa de agua; y, ii) sin el empleo de floculadores para el tratamiento de la masa de agua.

CAPITULO V: CONCLUSIONES

1. El promedio de las descargas medias mensuales multianuales del río Santa es de $137.92 \text{ m}^3/\text{s}$.
2. El promedio de las descargas medias mensuales multianuales del río Santa, considerando una restricción de $45 \text{ m}^3/\text{s}$ es de $68.40 \text{ m}^3/\text{s}$.
3. El promedio de las descargas medias mensuales multianuales del río Santa, considerando una restricción de $45 \text{ m}^3/\text{s}$ y una restricción de $88 \text{ m}^3/\text{s}$ es de $52.41 \text{ m}^3/\text{s}$.

4. Los caudales promedios con una persistencia del 50% de la oferta hídrica del río Santa, son los siguientes:

MESES (CAUDALES AL 50% DE PERSISTENCIA). M³/s											
ENERO	FEB	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGS	SEPT	OCT	NOV	DIC
87.89	88	88	88	52.05	29.84	23.25	17.22	23.40	31.78	47.15	72.39

5. La ecuación de densidad del sedimento para un periodo de 0 a 100 años, sin considerar aditivo es el siguiente:

$$y(\text{densidad}) = 41.446 \ln(t) + 1105.3 \quad (R^2 = 0.9976)$$

6. La ecuación de densidad del sedimento para un periodo de 0 a 100 años, con aditivo es el siguiente:

$$y(\text{densidad}) = 62.93 \ln(t) + 931.24 \quad (R^2 = 0.9976)$$

7. En los cálculos hidráulicos se ha determinado que las pérdidas totales en el sistema de aducción a las turbinas, es de: 3.97 m.
8. Se determina que la potencia media de la central hidroeléctrica a pie de presa Chavimochic es de 25.16 MW.
9. La energía total optimizada, comparando los 2 escenarios de análisis propuestos, entre los 50 años y 75 años de operación de la central hidroeléctrica a pie de presa del proyecto Chavimochic, asciende a 47,942,500 MWh; con lo cual se demuestra la hipótesis de la presente tesis indicada en el numeral 1.5.1 “Estructura de la hipótesis”.

CAPITULO VI: RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que se promuevan otros estudios de optimización de la generación de energía de las centrales hidroeléctricas a pie de presa, como en este caso, sería el tratamiento de la masa de agua del río Santa, mediante la construcción de una estructura de floculación, ubicada aguas abajo del desarenador.
2. Otros estudios que posibilitarían la optimización de la generación de energía en la central hidroeléctrica de Chavimochic estarían orientados a:

- a) La canalización del tramo comprendido entre el desarenador y el ingreso al embalse Palo redondo.
 - b) La reforestación de los taludes adyacentes al embalse Palo redondo.
3. Se recomienda que las diversas instituciones estatales del país relacionadas con el manejo del recurso hídrico en diversas zonas del país promuevan la construcción, operación y mantenimiento de estaciones hidrométricas.
4. Es importante que, en los diversos proyectos de irrigación del país, así como en lugares estratégicos de los cursos de agua en diferentes lugares del país, se implementen el suministro de equipamiento, operación y mantenimiento de medición de sedimentos.

Referencias Bibliográficas

- Aparicio, F. J. (1992). *“Fundamentos de Hidrología de Superficie”* (Primera reimpresión). Grupo Noriega Editores. (Original publicado en 1989).
http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/adamoren/HIDRO/Fundamentos_de_hidrologia_de_superficie_-_Aparicio.pdf
- Arias, J.L y Covinos, M. (2021). *“Diseño y Metodología de la investigación”*. (Primera

edición, junio 2021). Enfoques Consulting

EIRL.<file:///C:/Users/ewillis/Downloads/Arias-Covinos>

Diseño_y_metodologia_de_la_investigacion.pdf.

Arias, J.M.; LLanes E.A. (2021, 9 de abril). “¿Cuál es la gestión utilizada para la sedimentación en los embalses? <file:///C:/Users/ewillis/Downloads/206-Texto%20del%20art%C3%ADculo-483-1-10-20220722.pdf>.”

Becerra, G.R. (2018). “Plan para el adecuado manejo de sedimentos, que permite incrementar la vida útil del embalse Esmeralda”. <http://revistas.ustatunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/1645/1487>.

Bureau of Reclamation. (1973). *Design of Small Dams*. (Tercera edición). Bellisco Ediciones técnicas y científicas.

Calle, S.I. (2018). *Estudio de las técnicas de descolmatación de embalses*. [Tesis de grado, Universidad Particular de Piura – UDEP, de Peru]. Repositorio de la UDEP: https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3311/ICI_250.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Camargo, J. E., Franco, V. (1999). *Hidráulica de canales*. (Universidad Autónoma de México, Instituto de Ingeniería). <https://www.worldcat.org/es/title/hidraulica-de-canales-capitulo-5-del-manual-de-ingenieria-de-rios/oclc/56762617>

Chow, V.T. (2004). “*Hidráulica de los Canales Abiertos*”. Editorial Mc Graw Hill Interamericana S.A.

COES (2023). “*Procedimiento Operacional PR-13*”. “Cálculo de la energía firme, verificación anual de la cobertura de la energía comprometida y balance mensual de la potencia comprometida”. Perú. 25 p.

Domínguez, F.J. *Hidráulica* (1945). (Segunda edición ampliada). Talleres El Imparcial. Santiago de Chile. 649 p.

Disponible

en:<https://www.coes.org.pe/Portal/MarcoNormativo/Procedimientos/Tecnicos>

García, H, Nava, A. (2013). “*Selección y dimensionamiento de turbinas hidráulicas para centrales hidroeléctricas*”. (Primera edición – abril 2014). Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, México.
https://www.ingenieria.unam.mx/deptohidraulica/publicaciones/pdf_publicaciones/SELECyDIMENSIONAMIENTODETURBINAS.pdf

Imhof, A., Wong, S., Bosshard, P. (2002). *Comisión Mundial de Represas*. USA. (Traducción por Samuel DuBois). Editorial West Coast Print Center
https://www.archivochile.com/Chile_actual/patag_sin_repre/03/chact_hidroy-3%2000017.pdf

Ministerio de energía de Chile. *Sedimentos, hidráulica y efectos morfológicos*. (2016).
https://cambioglobal.uc.cl/images/proyectos/MesaHidro_Sedimentos_hidr%C3%A1ulica_y_efectos_morfol%C3%B3gicos.pdf

Ministerio de Energía y Minas de Perú. Decreto Ley N° 25844. *Ley de Concesiones Eléctricas*. (1992, p.41).
https://www.osinergmin.gob.pe/cartas/documentos/electricidad/normativa/LEY_CONCESIONES_ELECTRICAS.pdf

Ministerio de Energía y Minas de Perú. Decreto Supremo N° 009-93-EM. *Reglamento de la Ley de Concesiones Eléctricas*. (1993, p.161).
<https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/887409/DS-009-93-EM.pdf>

Organización de las Naciones Unidas – ONU. (2021). *Perspectivas de la gestión actual de sedimentos en nueve países de las Américas*.
<file:///C:/Users/ewillis/Downloads/377891spa.pdf>

Polanco, J.A, Ramírez-Atehortúa, F.H, Montes-Gómez, L.F, Botero-Hernández, B.A,

Otálvaro M. (2020). *Incidencia de la decisión de manejo de sedimentos en el valor de una central hidroeléctrica*. DYNA, 87(213).

<https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/81832/74708>

Proyecto Chavimochic. (2013). *Estudio de Factibilidad de la Tercera Etapa*. Volumen IV. Anexos. Tomo 3. Anexo 4. Transporte de sólidos.

Ruiz, R. (2007). *El Método Científico y sus Etapas*. <http://www.index-f.com/lascasas/documentos/lc0256.pdf>

Saravia, M. A. (2001). *Orientación Metodológica para la elaboración de proyectos e informes de investigación*.

https://metodoinvestigacion.files.wordpress.com/2008/02/metodologia_investigacion-cientifica_marcelo-saravia.pdf

Vásquez, M.P, Arriola, G.G. (2016). *Solución al problema de sedimentación de la represa Gallito Ciego*. Repositorio de la USS: <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/4194/Vasquez%20Rivera.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Willis, E.S. (2014). *“Evaluación Predictiva del caudal energético mediante análisis estocástico para afianzar la producción de electricidad en sistemas agroenergéticos”*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional “Pedro Ruiz Gallo”].

ANEXOS

ANEXO 1

FOTOS DE LA VISITA A LAS OBRAS DE LA BOCATOMA Y DESARENADOR DEL PROYECTO CHAVIMOCHIC



FOTOGRAFÍA 1: VISTA DEL DESARENADOR



FOTOGRAFÍA 2: VISTA COMPUERTAS DE INGRESO AL DESARENADOR Y LAS NAVES DE ESTA ESTRUCTURA



FOTOGRAFÍA 3: VISTA DE LA BOCATOMA



FOTOGRAFÍA 4: VISTA DE LA BOCATOMA



FOTOGRAFÍA 5: SALA DE CONTROL
DE LA BOCATOMA
ANEXO 2

Estudio de sedimentos

Desarenador del proyecto Chavimochic

GENERALIDADES

El diseño del desarenador del Proyecto Especial Chavimochic se realizó mediante un modelo hidráulico reducido y ensayos, a cargo del Instituto de Hidráulica, Hidrología e Ingeniería Sanitaria de la Universidad de Piura, mediante contrato firmado el 17 de enero de 1989.

La fecha de inicio del estudio del modelo el 20 de enero de 1989.

Fecha de culminación del estudio el 07 de julio de 1989.

El modelo hidráulico se basa en la semejanza de Froude y una escala geométrica de 1:15.

Caudal máximo de entrada al desarenador es 90 m³/s y concentración máxima de sedimentos en suspensión de 20 gr/l

Ensayos de investigaciones

Los objetivos de la investigación hidráulica fueron las siguientes:

Evaluar el diseño hidráulico de la transición de entrada

Controlar la distribución y magnitud de las velocidades y caudales de la nave

Estudiar las condiciones hidráulicas de la operación de purga de gruesos y de las naves

Evaluar las condiciones de flujo en la transición de salida.

Los objetivos de las investigaciones sedimentológicas estuvieron orientados a:

Evaluar la eficiencia del desarenador y definición de la longitud de las naves

Evacuar los sedimentos depositados en la transición de entrada y dentro de las naves.

Los caudales acordados para la investigación en el modelo hidráulico fueron los siguientes:

Caudales de investigación (m³/s)

Descripción	Caudales (m³/s)			Concentración de sedimentos en suspensión (gr/l)
	Entrada	Purga	Salida	
Primera Etapa del Proyecto				Concentración (Máximo) = 20.0 g/l Concentración (Promedio) = 5.70 g/l Concentración (Min) = 1.50 g/l
Máximo	22.83	2.83	20.00	
Promedio	18.50	2.50	16.00	
Mínimo	8.75	1.75	7.00	
Segunda Etapa del Proyecto				
Máximo	90.000	8.000	82.00	
Promedio	36.375	3.875	32.50	
Mínimo	22.830	2.830	20.00	

Velocidad de caída de los sedimentos del rio Santa – Estación Condorcerro

El siguiente cuadro, indican los resultados experimentales de la velocidad de caída para sedimentos del río Santa,

Velocidad de caída para sedimentos del río Santa. Estación Condorcerro – Enero – abril de 1981 - 1988

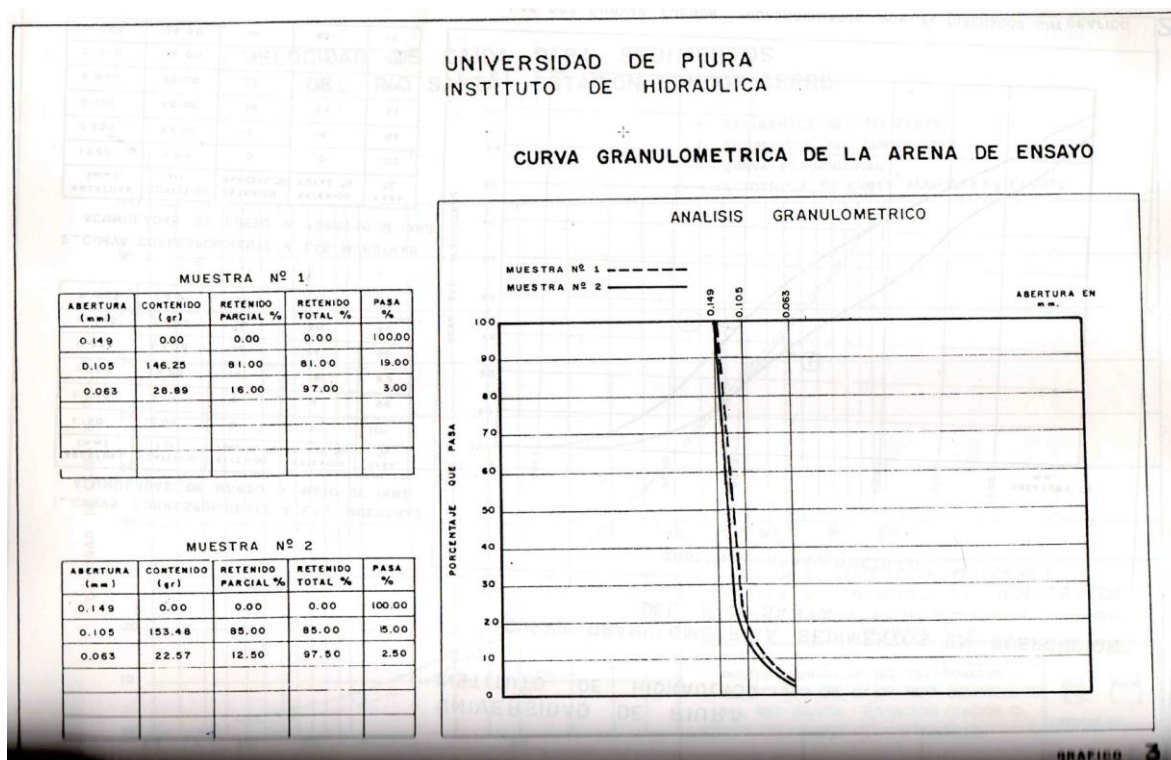
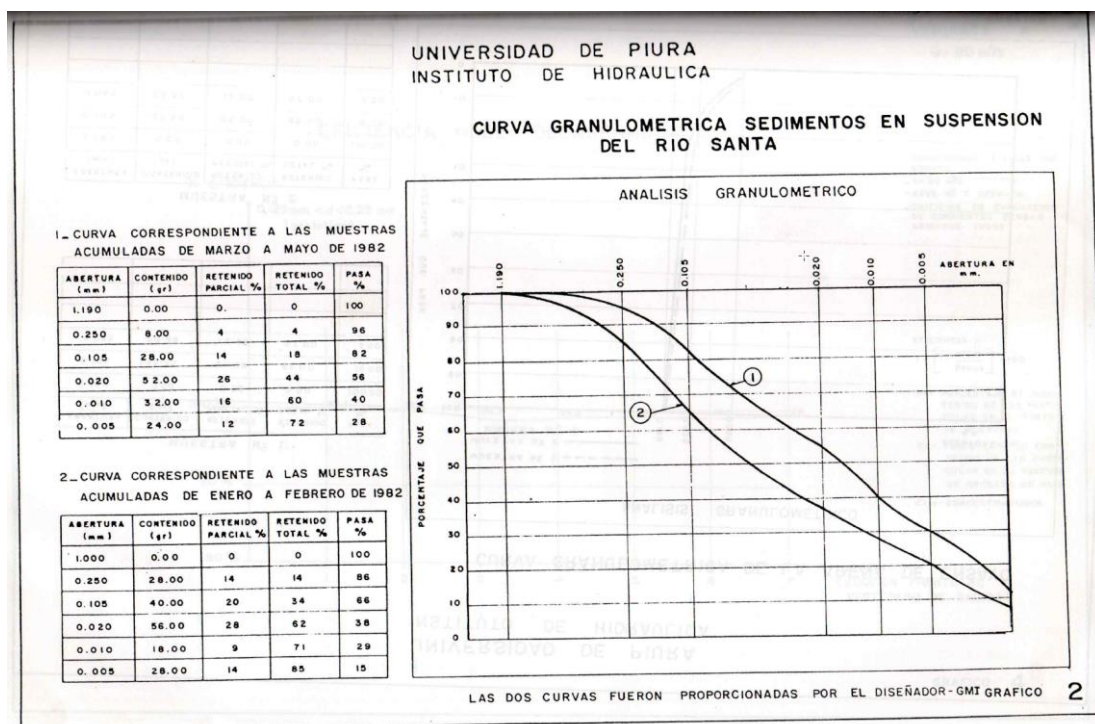
$\varnothing$ (mm)	Nº de pruebas	Velocidad de caída promedio (mm/s)
0.063	34	2.50
0.074	34	4.20
0.125	45	8.60
0.150	104	14.60
0.250	60	28.90
0.400	24	52.90
0.500	29	65.90
1.00	29	96.90
2.00	2	178.60

Composición granulométrica y peso específico

La distribución granulométrica de los sedimentos en suspensión del río Santa, muestran un gran % de sedimentos finos, desde arenas a arcillas. Aproximadamente, el 25% (máx) de los sedimentos en suspensión corresponde a partículas mayores a 0.15 mm.

La arena de los ensayos utilizada en las investigaciones, se modelaron partículas entre 0.420mm – 0.125mm, esto abarca aproximadamente el 30% de la curva granulométrica de los sedimentos en suspensión del río Santa.

Los gráficos 2 y 3 muestran ambas curvas granulométricas.



El peso específico determinado para las muestras de sedimentos del río Santa y para la arena de ensayo es 2.70.

Resultados de los ensayos

Además de perfeccionar el diseño original, los ensayos en el modelo permitieron conocer aspectos relacionados con la operación de las compuertas y ataguías, caudales convenientes para el lavado y purga de las naves y el tiempo requerido para realizar estas.

Los resultados de ensayos con sedimentos demostraron que la longitud adoptada del desarenador es suficiente, registrándose muy alta eficiencia en el modelo (98% - 100%).

Los sistemas de purga propuestos facilitan una limpieza total del fondo, tanto de la transición de entrada como del fondo de la nave.

CARACTERÍSTICAS DEL DESARENADOR

La estructura se encuentra ubicada entre las progresivas km 4+181 y km 4+404 del Canal de Derivación, siendo las características principales de diseño las siguientes:

Características principales del desarenador

Características	Unidades
Tipo de purga	Intermitente
Q diseño ingreso al desarenador	90.0 m ³ /s
Q purga de finos en las naves	8 m ³ /s
Ø mínimo a sedimentar	0.15 mm
Concentración máxima de sedimentos en canal de ingreso	20 gr/l
Concentración media de sedimentos en canal de ingreso	5.60 gr/l
Q diseño salida del desarenador	82 m ³ /s

Fuente. Manual de Operación y Mantenimiento de las obras del paquete “A” del proyecto. CHAVIMOCHIC. Octubre 1990.

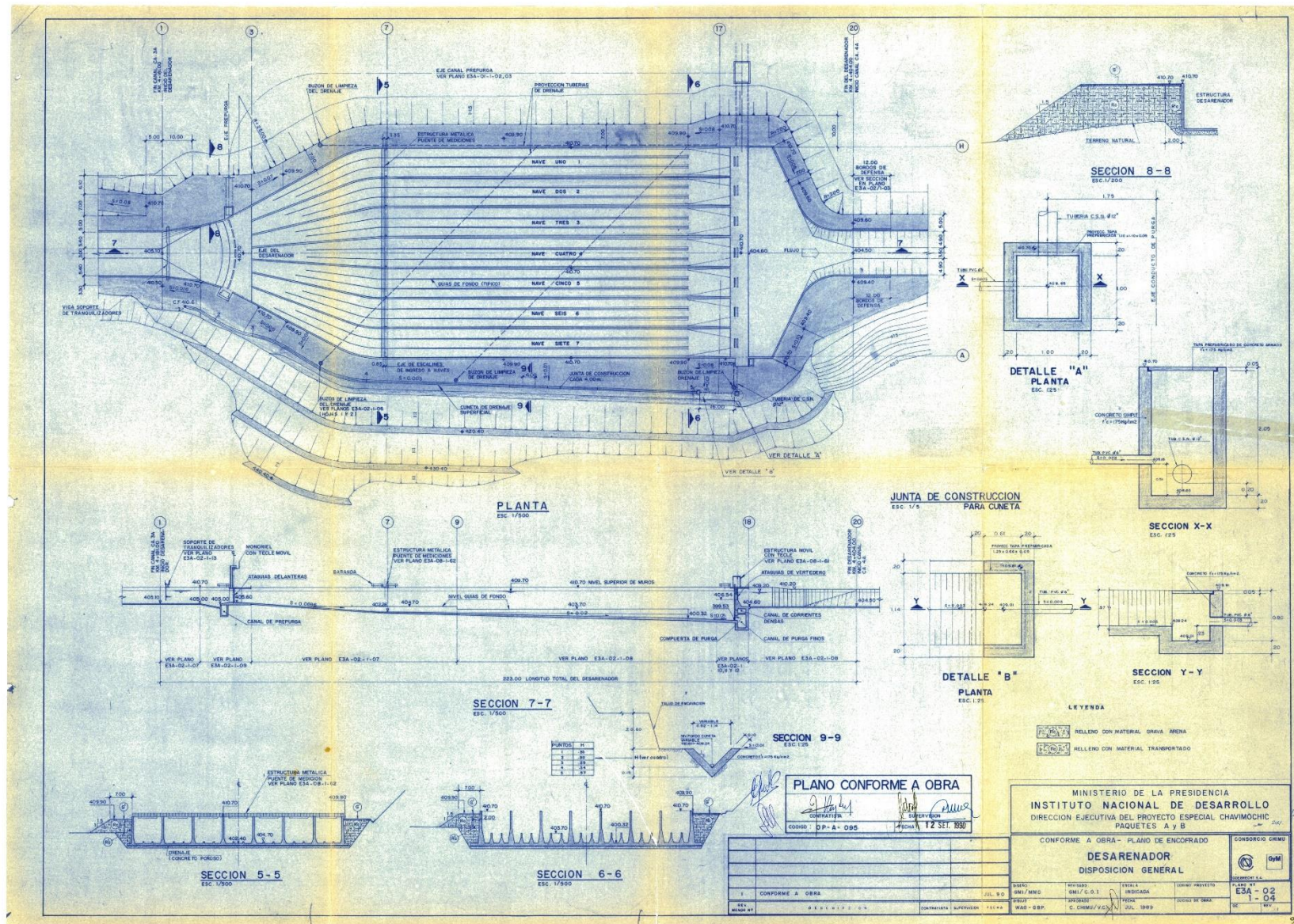
El diseño del desarenador cuya disposición general se muestra en la figura 1 siguiente, ha previsto los siguientes componentes:

Dimensiones y cotas principales del desarenador

Descripción	Longitud (m)	Progresivas		Cota (msnm)	Observación
Transición de entrada	10.0	4+181.0		405.10	Inicio del desarenador
Transición a naves de sedimentación				405.00	
Naves de sedimentación				410.70	Nivel superior del muro
Vertedero de salida				404.60	
Transición de salida			4+404.0	404.50	Fin del desarenador
Longitud total del desarenador	223.0			-	

Fuente. Ingeniería de detalle – Paquete “A”. INADE – Dirección Ejecutiva del Proyecto Especial Chavimochic.
Trujillo – agosto 1990. Plano conforme a obra.

Disposición general del desarenador



Transición de entrada

Tiene una longitud de 30.00 m y permitirá el paso de la sección trapezoidal del canal aguas arriba, a la sección rectangular del Desarenador propiamente dicho.

Asimismo, la transición de entrada cuenta con elementos tranquilizadores del flujo, de posición móvil, que permitirán una adecuada distribución de caudales en las naves, y que están constituidos por perfiles de acero de sección triangular con el vértice dirigido hacia aguas abajo, y están ubicados a 3.20 m aguas abajo de la última sección trapezoidal del canal de entrada.

La posición y número de estos elementos dependerá del caudal que esté ingresando a la estructura, según el siguiente cuadro:

Q (máx) m ³ /s	N° de elementos	Distancia entre elementos (m)	
		Extremos	Centrales
28	7	0.90	1.05
90	5	1.80	1.05

Sin embargo, la posición más conveniente para cada condición de caudal será establecida durante la operación del sistema una vez se haya efectuado la conducción de la amplia gama de caudales.

Sistema de purga de gruesos

Está destinado a atrapar las partículas de sedimentos de tamaño mayor de 2 mm que por saltación hayan pasado el Desripiador, sin ser eliminados.

Consta de un canal de recolección de los sedimentos transportados por el fondo, de un orificio de control del caudal y de un conducto de evacuación.

El canal colector se encuentra en el extremo aguas abajo de la transición de entrada en dirección transversal al eje del mismo. Su longitud es de 22.76 m y tendrá un caudal creciente.

En este conducto se ha diseñado e instalado tuberías de aire y de agua.

La tubería de aire tiene por objeto suministrar aire para la aireación bajo la lámina vertiente que cae al conducto interior de Prepurga, evitando de esta manera que se produzcan presiones negativas que a su vez ocasionen en la estructura el fenómeno de erosión por cavitación.

La tubería de agua tiene por objeto facilitar el inicio del flujo de descarga libre hacia el conducto interior de Prepurga en caso de taponamiento total de la ranura situada a lo largo del conducto interior de Prepurga.

El orificio de control tiene una sección cuadrada de 2.0 m x 2.0 m, es decir, el mismo ancho que el extremo final del canal colector.

El cierre del orificio se efectuará mediante una compuerta de servicio tipo deslizante, de 2.0 m x 2.0 m sometida a una presión no equilibrada de 10.40 m y de operación manual. El conducto de evacuación que se inicia a la salida del orificio de la compuerta es un conducto cubierto de sección interior cuadrada de 2.5 m x 2.5 m, siendo la pendiente de fondo de $s = 0.01$ en su mayor parte, aumentando a $s = 0.06215$ cerca de su confluencia con el canal de purga de finos.

La longitud de este conducto es de aproximadamente 194 m, con flujo totalmente en régimen supercrítico.

Su convergencia con el canal de purga de finos es con un ángulo de 90 y mediante un pique; el fondo del conducto de evacuación de Prepurga se encuentra a 2.30 m por encima del fondo del canal de purga, de manera que la abertura que se requiere en la pared izquierda del canal de purga no interfiera el flujo de caudales normales en este último.

Desarenador propiamente dicho

Estará compuesto por 7 naves de 9.00 m de ancho cada una, que en una longitud de 115 m permitirá la decantación del sedimento fino con partículas $\varnothing 0.15$ mm. La velocidad en los estanques será < 0.25 m/s.

La pendiente del fondo del desarenador propiamente dicho es de 2% para los primeros 100 m y de 5% para los últimos 15 m. Cada nave posee guías de fondo constituidas por muros de altura variable que permiten un mejor proceso de lavado de los sedimentos de fondo durante la purga.

Cada nave también dispone de una estructura de cierre con ataguías de metal operadas a través de un sistema de rnonorriel eléctrico a fin de interrumpir el flujo para el proceso de purga. Existe un sistema de izaje manual para casos de emergencia.

Sistema de purga de finos

Está constituido por un sistema de orificios colocados en cada nave y de una cámara de purga para el caudal utilizado durante el proceso de lavado. Los orificios de salida tienen 3.00 m de ancho y 1.50 m de altura y serán controlados mediante un sistema de compuertas planas operadas eléctricamente desde el puente de maniobras ubicadas sobre la sección de control.

La cámara de purga tiene 3.50 m de ancho, y se le ha dado una pendiente supercrítica que permita el lavado de los sedimentos. Además, ha sido protegida contra la abrasión mediante una capa de endurecedor.

Orificios de corrientes densas

Se encuentran ubicados sobre la pared del vertedero final del Desarenador.

Tienen un diámetro de 811 y se ubican 6 en cada nave. Permitirán evacuar 8 m³/s por 42 orificios (6 x 7 naves) en el caso en que ingresen 90 m³/s y no se está purgando nave alguna, o cuando se cierre el ingreso a una nave para permitir su vaciado y se sobrecarguen temporalmente las otras 6 naves.

Conducto de evacuación

Se inicia con el orificio de salida de la cámara de purga. El diseño de este conducto ha contemplado la posibilidad de servir como botadero del Canal de Derivación, es decir, para desviar hacia el río Santa, en casos excepcionales, el total del caudal de derivación. El conducto de purga de finos tiene una longitud aproximada de 195 m con alineamiento recto, con pendientes de 0.02 y 0.16, tratándose de una rápida, pues el régimen es

supercrítico. La sección transversal es rectangular, de 3.50 m de ancho; el primer tramo de 50 m será cubierto con techo abovedado con una altura de 3.50 m mientras que el tramo abierto tendrá una altura de 3.00 m.

En el extremo final la rápida termina en un salto de esquí, con radio de 10 m y ángulo de lanzamiento de 20° , que estará ubicado a la cota 379.10 m.s.n.m., es decir, a unos 3 m por encima del nivel de avenidas del río Santa.

En el caso del lanzamiento de caudales altos, la trayectoria del chorro alcanzará el cauce del río Santa, sin llegar a la margen opuesta. La trayectoria de caudales menores no alcanzará el cauce del río en estiaje.

Sección de control

Se encuentra ubicada al final de las naves y está constituida por 7 orificios de 3.00 m de ancho x 1.70 m de altura colocados en el nivel 406.54 msnm y que permitirá el paso del caudal aguas abajo del Desarenador.

Su diseño ha sido verificado en el modelo reducido de manera de que para los diferentes caudales no produzcan remanso en el canal de entrada que induzcan a sedimentaciones aguas arriba del Desarenador.

Esta sección funcionará como un vertedero de pared gruesa con contracciones laterales para caudales de ingreso al desarenador menores de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ y como orificio para caudales entre 60 y $90 \text{ m}^3/\text{s}$.

Para evitar el reingreso de agua de la transición de salida hacia la nave en proceso de vaciado y purga se dispondrá de una ataguía para cerrar el orificio de sección de control de 3.00 x 1.70 m.

Transición de salida

El modelo hidráulico ha sugerido la construcción de una transición corta para pasar de la sección rectangular de la poza de descarga de la sección de control a la sección trapezoidal del Canal de derivación aguas abajo del desarenador, con el fin de evitar la

sedimentación en la misma. Debido a la turbulencia ha sido necesario sobre elevar la berma del canal mediante la colocación de unos muretes de concreto armado en una longitud de 18 m.

Equipo electromecánico

Un juego de ataguías metálicas de 2 hojas de 2.70 m x 2.25 m para el cierre de las naves.

Un juego de ataguías metálicas de 2 hojas de 2.10 m x 2.25 m para el cierre de las naves.

Un sistema de izaje eléctrico constituido por un monorriel, trolley y tecles de izaje y traslación para la operación de las ataguías de cierre de las naves.

Una compuerta plana de 2.00 m x 2.00 m para el conducto de purga de gruesos.

Siete compuertas planas con accionamiento eléctrico de 3.00 m x 1.50 m para los orificios de la purga de finos.

Una ataguía metálica de 3.0 m x 1.70 m para el cierre de los orificios de la sección de control.

Un sistema de izaje de la ataguía de 3.00 m x 1.70 m constituido por un carrito sobre rieles, tecla de izaje y trolley.

Una compuerta de 1.20 m x 1.20 m para el cierre del conducto de los orificios de corrientes densas.

TIPOS DE OPERACIÓN

Operación rutinaria

Comprende todas aquellas actividades a ser realizadas durante las condiciones normales de funcionamiento del Desarenador, las mismas que abarcan los siguientes aspectos:

- a) Lectura de los niveles de agua en las secciones de ingreso a las ataguías de entrada, compuertas de purga y orificios de salida, con el fin de determinar las aberturas requeridas de las mismas, durante las operaciones de purga.

- b) Lectura de los niveles de agua a la entrada del Desarenador con el fin de detectar los remansos ocasionados por los sedimentos depositados en la transición de entrada y que marcarán las necesidades de la purga de los materiales gruesos.

c) Control de los depósitos de sedimentos: se debe tener en cuenta que el nivel de sedimentos en las naves no debe exceder la altura de las guías de fondo. Este control se efectuará desde el puente de maniobras, que está ubicado en la zona, que según los resultados del modelo hidráulico será la sección que más rápido se llenará de sedimentos, y a través de una barra metálica con división métrica la que tendrá en el extremo un pequeño muestreador de sedimentos. En esta sección la altura de las guías de fondo es de 2.44 m.

d) Toma de muestras con turbisonda:

Análisis de la concentración de sedimentos en el canal de llegada: Análisis visual permanente y, mediante muestras Cada hora, en la época de avenidas; y diariamente, en el período de estiaje.

Análisis de la concentración de sedimentos en el canal de salida, diariamente (cálculo de eficiencia).

Análisis químico del agua en la entrada y salida del Desarenador, semanalmente o según se juzgue necesario.

El operador del Desarenador estará informado sobre la situación hidrológica del río Santa a través de comunicación radial con el operador de la Bocatoma.

Si la concentración de sedimentos es mayor de 20 gr/l, el operador del Desarenador pedirá el cierre de las compuertas de la Bocatoma y si la concentración es menor a 20 gr/l, se procederá a efectuar la purga de las naves en forma rutinaria.

e) *Purga de las naves*: El Desarenador está dimensionado para operar con seis naves activas y una nave de purga. Se estima que la frecuencia de la purga de una nave es de 3 días aproximadamente. En el período experimental de operación del Desarenador (debe efectuarse entre los meses de enero y abril), se establecerá la frecuencia real, realizando mediciones de los niveles del sedimento atrapado.

- f) El inicio de la purga de una nave se establecerá las mediciones del nivel de sedimento en la sección indicada en el acápite (c), cuando el mismo llegue hasta 0.30 m por debajo del nivel de las guías de fondo.

La nave para purgar debe cerrarse mediante la colocación de las ataguías de entrada y la ataguía del orificio de salida, vaciándose el volumen de agua a través del orificio de purga. El orificio de salida se cerrará con la ataguía, con el fin de evitar el retorno del agua desde la transición de salida hacia la nave en purga. Asimismo, la compuerta de los orificios de corrientes densas será cerrada.

El vaciado de la nave debe efectuarse abriendo la compuerta lentamente para así evitar caudales excesivos por el conducto de purga. Se debe procurar vaciar la nave con un caudal entre 8 y 12 m³/s, operación que será efectuada graduando la abertura de la compuerta en función de la carga medida según lo indicado en el acápite (a). La abertura de la compuerta para los rangos de niveles indicados serán los siguientes:

Rango de niveles	abertura de compuerta (m)
409.70 – 407.53	0.35
407.53 – 404.53	0.45
404.53 – 402.53	0.60
402.56 – 401.53	0.80
< 401.53	1.50

Fuente. Manual de Operación y Mantenimiento de las obras del paquete “A” del proyecto. CHAVIMOCHIC. Octubre 1990.

Una vez vaciada la nave y estando totalmente abierta la compuerta de purga, se procederá a levantar las ataguías de entrada a fin de hacer ingresar el caudal previsto para la purga de 8 m³/s. Si es necesario acrecentar el efecto de limpieza, se intervendrá abriendo y cerrando sucesivamente las ataguías para introducir "golpes" de agua y rectificar posibles defectos en la operación. El caudal de ingreso a la nave en purga es función de la carga de agua medida aguas arriba de la entrada según lo

indicado en el acápite (a) y de la abertura de la ataguía que será levantada en su conjunto por lo que funcionará como orificio.

Una vez terminado el lavado del fondo de la nave, la compuerta de purga se colocará en posición intermedia para evitar la influencia de pulsaciones de presión, mientras se llena la nave a través de la ataguía de salida, que se va abriendo para dejar libre el orificio. A la vez se abrirá completamente la entrada de la nave, y una vez llenada hasta el nivel del orificio de salida, se cerrará totalmente la compuerta de purga.

Operación sistemática

Las labores para realizar como parte de la operación sistemática del Desarenador comprenden las siguientes actividades:

- a) *Purga de la transición de entrada:* Una vez que se haya detectado el remanso en el canal de entrada por lectura de la mira según lo indicado en el acápite (b) del punto anterior, utilizando la curva de gastos del canal respectivo, se pondrá en marcha el sistema de la purga de gruesos, pues será indicativo que existen sedimentos depositados en la transición. Para ello se recomienda coordinar la operación de cierre parcial de la Bocatoma, bajando el caudal de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, operación que permitirá el ingreso de todo el caudal por el conducto de la Prepurga originando un flujo a descarga libre que lavará el sedimento depositado aguas arriba del Desarenador.
- b) *Limpieza general del Desarenador:* Esta actividad comprende la limpieza simultánea de la transición de entrada combinada con la limpieza de las naves. Para ello el caudal de la Bocatoma debe ajustarse a $40 \text{ m}^3/\text{s}$, momento en el cual se empieza a vaciar las naves del Desarenador, abriendo las compuertas de purga de finos hasta que se establezca un régimen supercrítico en el fondo de las naves y en su transición de entrada, interrumpiéndose el flujo aguas abajo del Desarenador.

Tanto la secuencia de este tipo de limpieza como el caudal utilizado para ella serán ajustados de acuerdo con la experiencia que se obtenga durante la explotación del sistema.

Operación en Condiciones Extraordinarias

Las condiciones extraordinarias abarcan una gama de situaciones caracterizadas por cambios bruscos del estado del sistema, ocasiones en las cuales se requiere que la operación del Desarenador se realice con seguridad.

Los posibles cambios pueden deberse a la ruptura del Canal de Derivación aguas abajo del mismo, ingreso de un caudal mayor de $90 \text{ m}^3/\text{s}$ al Desarenador y almacenamiento brusco de depósitos de sedimentos en la entrada del mismo.

En todos estos casos el operador deberá tratar de evacuar el agua en el Desarenador a través de los orificios de purga tanto de gruesos como de finos y solicitando en forma inmediata el cierre de las compuertas de la Bocatoma. Una vez cumplidas las medidas de emergencia y habiendo establecido las condiciones para un normal funcionamiento de la estructura, se restablecerá el servicio.

Se debe indicar en este acápite, que el sistema de compuertas de la purga de finos del Desarenador permite la evacuación hacia el río Santa de la totalidad del caudal de diseño de la estructura ($90 \text{ m}^3/\text{s}$), interrumpiendo totalmente el flujo aguas abajo de la misma. En este caso la operación consistirá en abrir totalmente solo las 4 naves centrales simultáneamente, con lo que se originará una descarga inicial de alrededor de $102 \text{ m}^3/\text{s}$ la misma que irá descendiendo hasta alcanzar el caudal que esté ingresando a la estructura.

Se debe señalar que, de acuerdo con los diseños del equipo electromecánico, la capacidad máxima del grupo electrógeno sólo permite abrir 4 compuertas simultáneamente.

Dentro de estas actividades también se debe incluir la operación de la estructura para concentraciones medidas en el canal de entrada superiores a 20 gr/l , en cuyo caso como ha sido indicado, se procederá al cierre de las compuertas de la Bocatoma. Durante este período se continuará con el muestreo y análisis de la concentración; el flujo en el canal permanece un tiempo después del cierre y será utilizado para la limpieza de las naves y transición de entrada de acuerdo con lo indicado en el acápite (a) de las operaciones

periódicas. Una vez que la concentración en el río baje a 15 gr/l se restablecerá el flujo del Canal de Derivación dando apertura a las compuertas de la Bocatoma. Este valor de 15 gr/l deberá ser ajustado durante la operación del sistema.

SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN DEL DESARENADOR CHAVIMOCHIC

El muestreo de los sedimentos en suspensión del desarenador se ejecuta por personal especializado en muestreo de sedimentos. El presente estudio, no considera muestreos de las cuencas de Tablachaca, Santa, estación Condorcerro y Bocatoma; el objetivo es determinar los sedimentos en suspensión que ingresaría a la presa Palo Redondo.

Geoquímica de los sedimentos

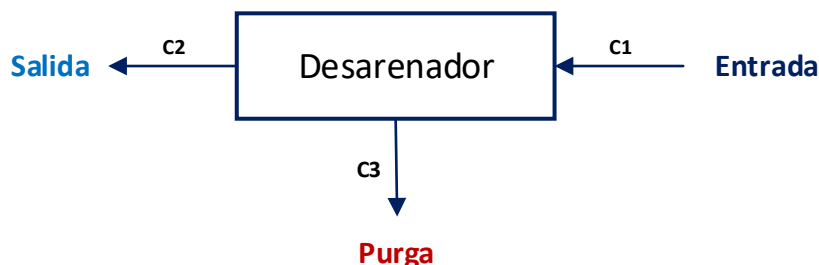
Los análisis de sedimentos por difracción de Rayos X se han efectuado en el laboratorio de INGEMMET el 2007. En las naves del desarenador se ha determinado que están conformados principalmente del 87% en promedio de Cuarzo (sedimento de fondo).

A continuación, se muestran los resultados de los muestreos realizados en las naves 2, 4 y 6; el objetivo es establecer que porcentaje de cuarzo existe en cada una de dichas naves:

Nº Nave	% Cuarzo
02	90.06
04	89.30
06	81.74
	90.28
	83.30

Frecuencia de monitoreo anual

El muestreo de sedimentos en suspensión y volumen de agua se realizan al Ingreso – Salida del desarenador; en horarios de 06:00 horas y 18:00 horas, durante todo el año en forma permanente. Algunas veces ha sido interrumpido por acciones de mantenimiento, emergencias y COVID 19.

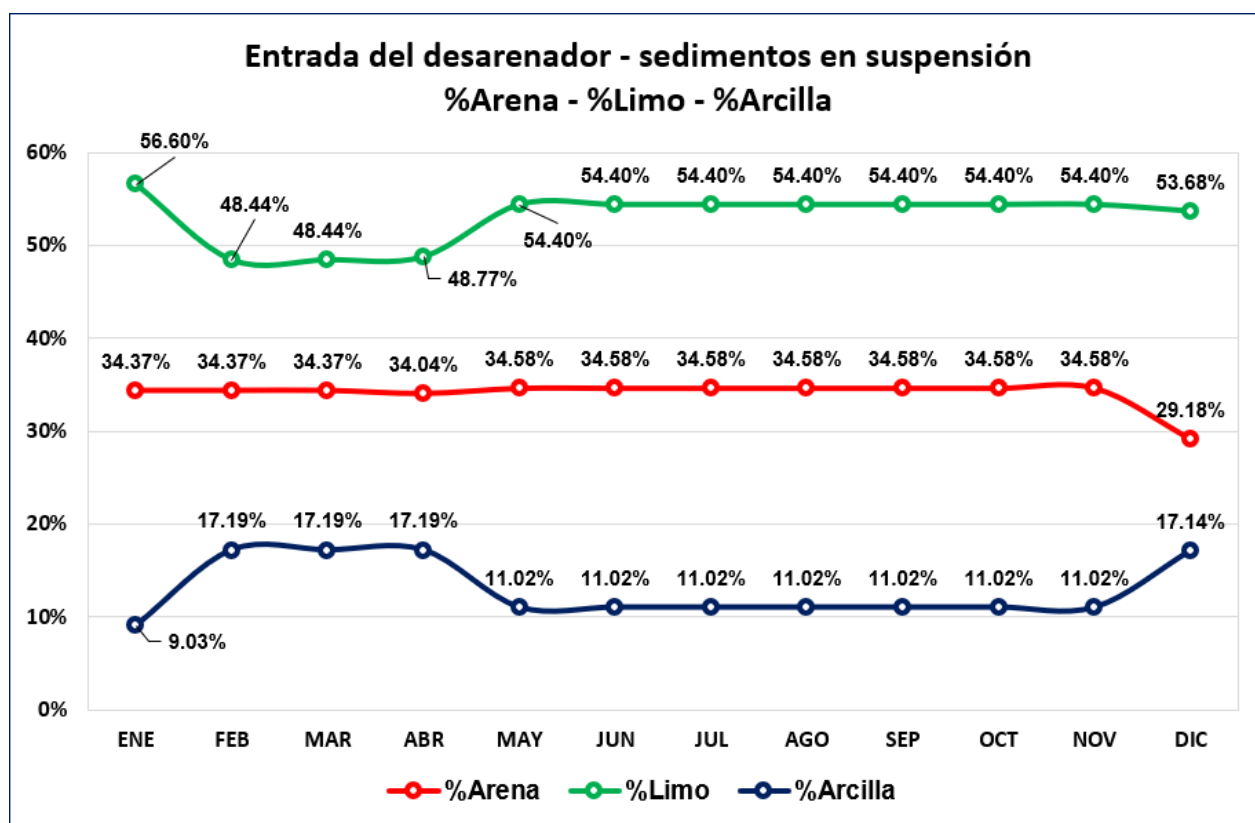


Del historial de concentración de sedimentos en suspensión del desarenador es 1999 – 2022, se han descartado algunos datos, por las siguientes consideraciones:

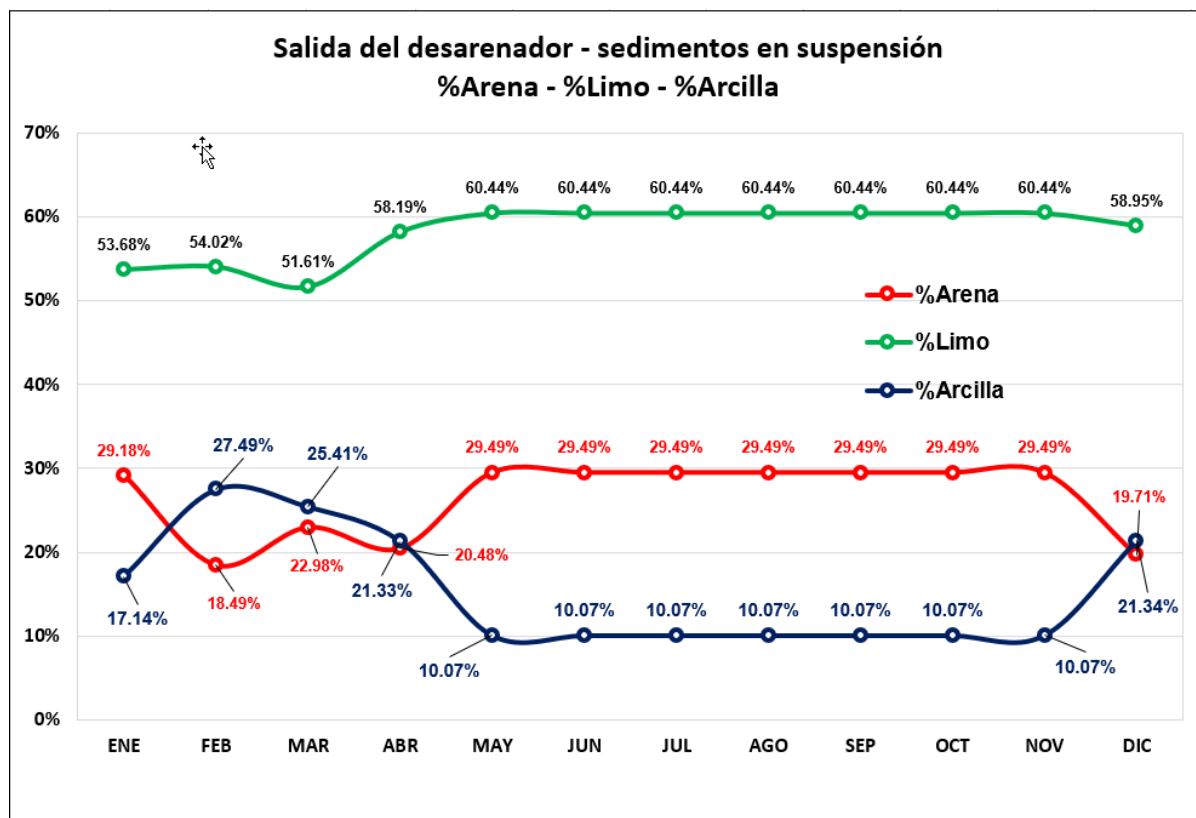
- De acuerdo con lo descrito, se puede apreciar que algunas veces han sido descartada la información de caudales y otras veces las concentraciones en suspensión.

En el laboratorio de sedimentos del desarenador, se han realizado pruebas de Bouyoucos, para determinar los % arena - % limo - % Arcilla, de los sedimentos en suspensión a la entrada y salida en el desarenador; con los siguientes resultados:

[illegible]



Fuente: Laboratorio de sedimentos – Desarenador. P.E. Chavimochic, 2006.



De las figuras anteriores, se deduce lo siguiente:

Ingreso al desarenador.

- 1°. El mayor % siempre son los Limos, seguido de arenas y arcillas; esto es durante todo el año.
- 2°. El % de arenas es % constante; % de limos desciende en avenidas y constante el resto del año.
- 3°. El % Arcillas se incrementa en avenidas y constante en estiaje.

Salida del desarenador.

- 1°. Los Limos presentan mayor % que las arenas y arcillas durante el año; es decir que los limos decantan parcialmente en el desarenador.
- 2°. El desarenador funciona muy bien para arenas, pero no para limos y arcillas. Para mejorar la eficiencia de la infraestructura se deberá adicionar floculantes. La eficiencia para las arenas en épocas de avenidas se reduce, posiblemente por las altas concentraciones de sedimentos. En época de avenidas el porcentaje de Arena (baja), % Limo (casi constante) y % Arcillas (se incrementa) esto reduce la eficiencia del desarenador; teniendo en cuenta que las arcillas y limos son difíciles de decantar por estar inmersos en fuerzas electrostáticas y las arenas con fuerzas gravitacionales.

Recomendación.

- 1°. Elaborar un protocolo de la cadena de muestreo
- 2°. Optimizar los muestreos en avenidas (mínimo 03 veces: entrada y salida) y estiaje (01 vez: entrada y salida)
- 3°. Realizar pruebas de Bouyoucos en la entrada y salida del desarenador, de los sedimentos en suspensión
- 4°. Realizar el cálculo de la eficiencia del desarenador diariamente y un balance de agua y sedimentos diariamente.
- 5°. Realizar la preparación de muestras para el estudio geoquímico de las mismas en el laboratorio de INGEMMET. El objetivo es establecer, la presencia de metales pesados en los sedimentos y el Índice de Geoacumulación (I_{geo}), que es una medida cuantitativa de la contaminación de metales en los sedimentos depositados en la presa Palo Redondo.

Densidad promedio de sedimentos de suspensión Entrada – Salida del desarenador

Densidad – Entrada del desarenador

El comportamiento de la densidad en la entrada del desarenador según los cálculos del laboratorio disminuye en la época de avenidas (1,204.22 a 1,191.1 gr/l) y permanece constante (1,191.11 gr/l) en estiaje; se reduce nuevamente en las primeras lluvias entre noviembre y diciembre.

Densidad – Salida del desarenador

La pérdida principalmente de arenas y en menor escala de limos, en avenidas la densidad disminuye y en la época de estiaje es constante (1,175.91 gr/l), esto se debe que los %Arena-%Limo -%Arena son constantes. Ver los siguientes gráficos.

Concentraciones promedio de sólidos en suspensión al ingreso – salida del desarenador

Entrada del desarenador - Concentraciones promedio

Al respecto, se ha realizado la recopilación de concentraciones mensuales promedio de mes a mes durante el año; y corresponde al promedio mensual de 20 años de muestreos; las mayores concentraciones se encuentran en la época de avenidas, principalmente en enero (1.18 gr/l), febrero (1.95 gr/l), marzo (3.53 gr/l) y abril (2.04 gr/l).

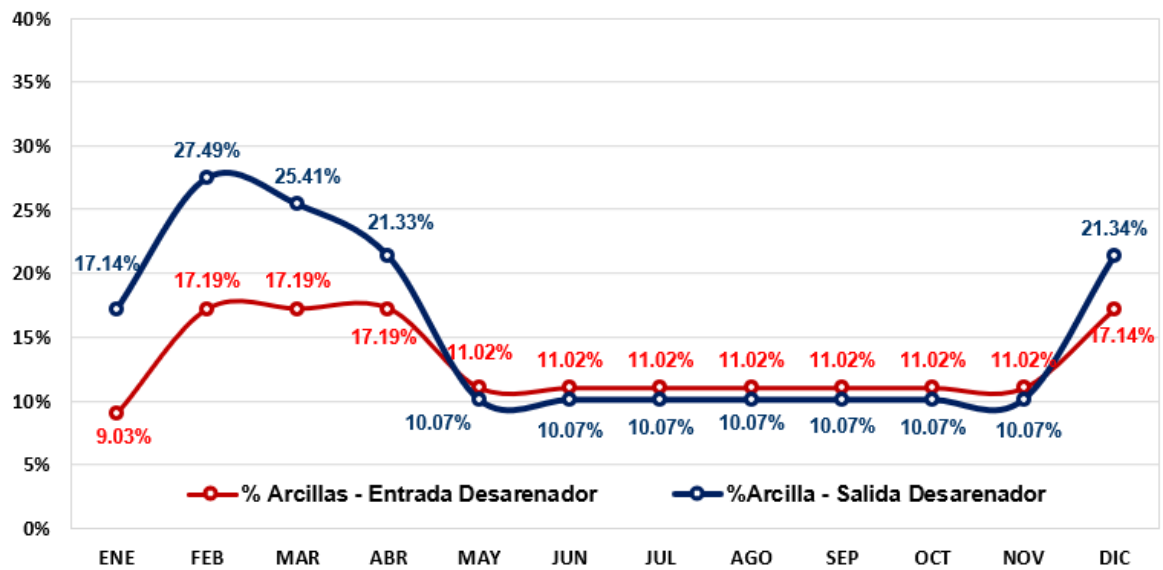
El estiaje, se determina entre los meses de mayo (0.44 gr/l) – oct (0.39gr/l).

Salida del desarenador - Concentraciones promedio

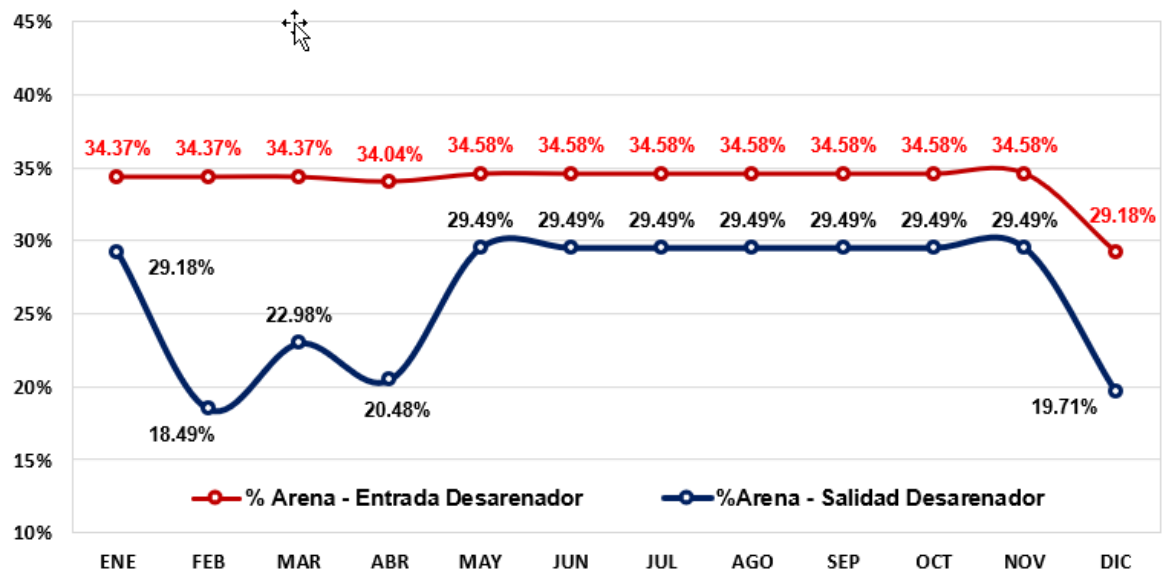
Corresponde a la carga sólida que ingresa actualmente al sistema hidráulico del Proyecto Especial Chavimochic; y en el futuro será la carga sólida que ingrese al embalse Palo Redondo. En la gráfica correspondiente, claramente se tiene concentraciones promedio: enero (0.81 gr/l), febrero (1.28 gr/l), marzo (2.47 gr/l) y abril (1.29 gr/l).

El estiaje está entre mayo (0.32 gr/l) – oct (0.26 gr/l). Claramente se observa, que el periodo de avenida, y estiaje están relacionados con los sólidos en suspensión.

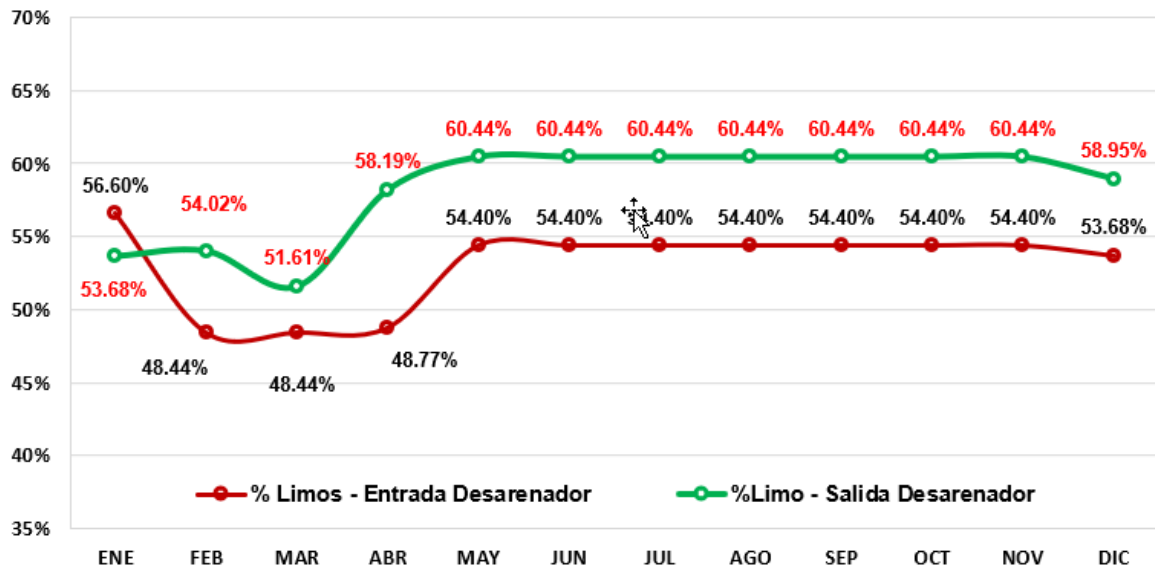
Entrada / Salida del desarenador - sedimentos en suspensión
%Arcillas



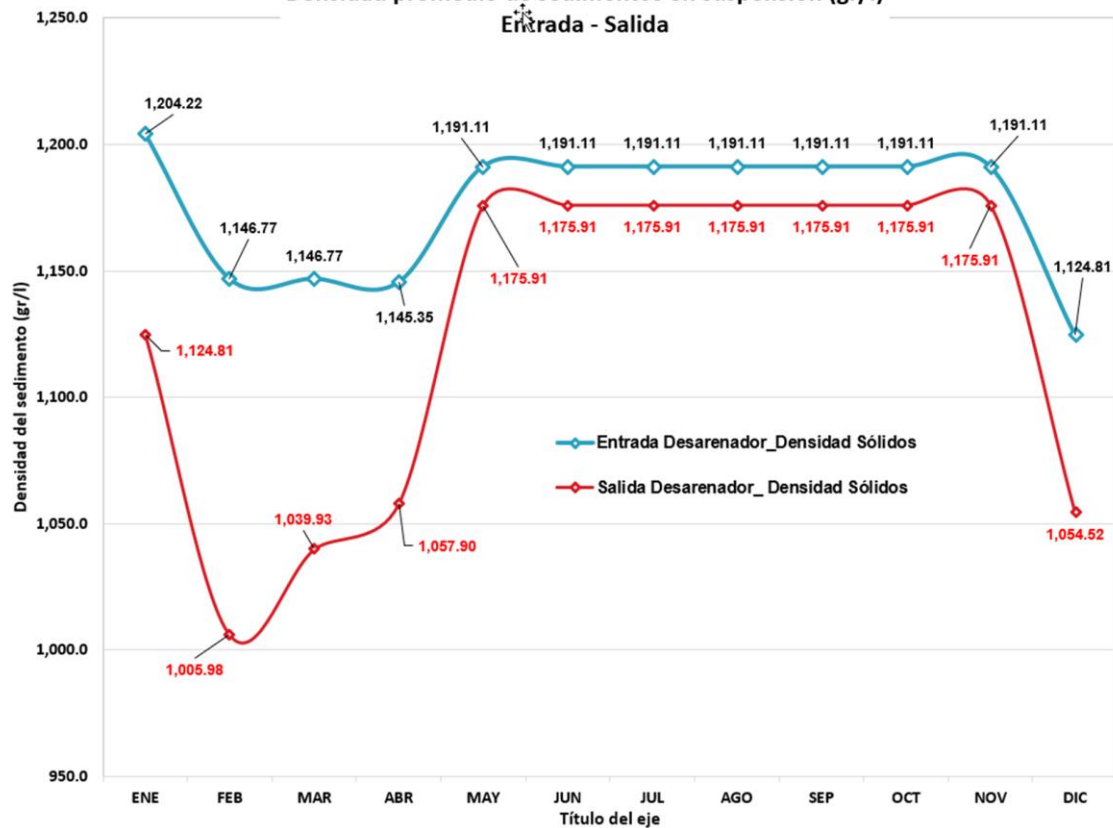
Entrada / Salida del desarenador - sedimentos en suspensión
%Arena



Entrada / Salida del desarenador - sedimentos en suspensión %Limos



Densidad promedio de sedimentos en suspension (gr/l) Entrada - Salida



Ingreso Desarenador - Concentración Promedio de Sólidos en suspensión (gr/l)

Ingreso a Desarenador Concentración Promedio de sedimentos en suspensión (gr/l)												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	0.62	3.66	6.08	3.24	0.81	0.28	0.21	0.28	0.43	0.28	2.13	1.70
2001	7.51	4.55	11.87	3.31	0.98	0.40	0.41	0.30	0.40	0.40	2.22	1.29
2002	0.58	2.44	7.37	3.16	0.23	0.35	0.23	0.24	0.20	1.05	2.51	2.22
2003	0.99	2.71	2.97	1.75	0.33	0.26	0.19	0.25	0.25	0.28	0.29	0.95
2004	0.42	1.24	1.01	0.64	0.28	0.24	0.26	0.25	0.32	0.74	1.56	1.03
2005	0.84	1.54	2.89	0.89	0.17	0.11	0.10	0.11		0.32	0.16	0.77
2006	1.05	3.30	5.53	4.98		0.45	0.09	0.12	0.14	0.27	0.37	0.46
2007	1.51	0.96	2.90	2.82	0.50	0.25	0.17	0.14	0.14	0.44	0.60	0.45
2008	2.05	2.01	1.97	1.99	0.65	0.22	0.16	0.17	0.20			
2009	2.18	3.54	3.99	3.26	0.43	0.19	0.14	0.13	0.16	0.73	0.95	1.81
2010	0.71	1.48	1.58	2.23	0.91	0.19	0.24	0.22	0.27	0.33	0.50	1.36
2011	1.30	1.12	1.28	3.20	0.32	0.16	0.20	0.20	0.18	0.25	0.39	1.36
2012	1.48	3.91	2.54	2.70	0.52	0.17	0.12	0.12	0.13	0.29	0.71	0.50
2013	0.47	1.51	5.63	1.19	0.29	0.28	0.20	0.29	0.22	0.67	0.26	0.94
2014	0.52	1.64	3.22	0.76	0.67	0.09	0.13	0.13	0.15	0.21	0.22	0.68
2015	1.46	0.79	3.12	1.42	0.50	0.11	0.08	0.08	0.10	0.18	0.26	0.69
2016	0.38	1.48	1.44	0.63	0.12	0.10	0.12	0.11	0.09	0.22	0.13	0.26
2017	0.80	1.16	4.89	2.21	0.63	0.14	0.10	0.10	0.15	0.19	0.11	0.46
2018	0.75	0.60	2.07	2.00	0.42	0.12	0.08	0.08	0.07	0.19	0.31	0.62
2019	0.77	2.08	2.46	0.97	0.17	0.10	0.10	0.09	0.12	0.22	0.29	1.34
2020	0.36	0.39										
2021	0.15	1.85	0.97	0.41	0.12	0.13	0.13	0.18	0.44	0.47	0.81	
2022	0.27	0.99	1.97	1.04	0.16	0.14	0.13	0.16				
Max	1.18	1.95	3.53	2.04	0.44	0.20	0.16	0.17	0.21	0.39	0.74	0.99
Años	23	23	22	22	21	22	22	22	20	20	20	19

Salida Desarenador - Concentración Promedio de Sólidos en suspensión (gr/l)

Ingreso a Desarenador												
Concentración Promedio de sedimentos en suspensión (gr/l)												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	0.40	2.65	3.93	1.46	0.62	0.28	0.19	0.28	0.37	0.28	0.31	1.28
2001	4.85	3.16	7.81	1.50	0.18	0.21	0.29	0.26	0.30	0.15	0.06	0.32
2002	0.13	0.81	2.95	0.62	0.16	0.20	0.16	0.17	0.13	0.24	0.70	0.51
2003	0.38	0.53	0.60	0.41	0.18	0.19	0.11	0.23	0.17	0.16	0.16	0.32
2004	0.19	1.24	0.86	0.46	0.25	0.22	0.22	0.22	0.25	0.53	1.17	0.56
2005	0.51	0.84	1.89	0.61	0.11	0.09	0.09	0.10		0.22	0.12	0.37
2006	0.39	1.38	3.93	3.16		0.26	0.08	0.11	0.12	0.22	0.20	0.17
2007	1.05	0.66	1.95	2.08	0.38	0.21	0.14	0.11	0.12	0.35	0.47	0.36
2008	1.60	1.58	1.82	1.67	0.55	0.21	0.15	0.15	0.18			
2009	1.64	2.96	3.15	2.53	0.37	0.16	0.13	0.11	0.13	0.57	0.69	1.36
2010	0.57	0.94	0.98	1.31	0.45	0.14	0.18	0.20	0.20	0.22	0.34	0.76
2011	0.73	0.62	0.74	1.89	0.19	0.14	0.17	0.16	0.14	0.20	0.31	0.92
2012	0.73	3.47	2.06	1.93	0.39	0.11	0.10	0.09	0.09	0.22	0.45	0.31
2013	0.29	0.96	3.98	0.82	0.35	0.18	0.14	0.18	0.14	0.41	0.17	0.64
2014	0.41	1.16	2.36	0.52	0.52	0.08	0.12	0.11	0.12	0.16	0.18	0.54
2015	1.04	0.61	2.78	1.13	0.45	0.10	0.07	0.07	0.08	0.15	0.21	0.47
2016	0.33	1.28	1.17	0.48	0.10	0.09	0.11	0.09	0.07	0.16	0.10	0.23
2017	0.67	0.97	4.27	1.92	0.51	0.11	0.09	0.09	0.12	0.16	0.09	0.38
2018	0.82	0.49	1.66	1.62	0.35	0.09	0.07	0.07	0.06	0.17	0.26	0.51
2019	0.63	1.78	2.10	0.85	0.15	0.10	0.08	0.08	0.10	0.19	0.26	0.98
2020	0.30	0.35										
2021		0.13	1.60	0.55	0.35	0.09	0.10	0.11	0.14	0.39	0.32	0.64
2022	0.23	0.78	1.81	0.98	0.15	0.10	0.12	0.13				
Max	0.81	1.28	2.47	1.29	0.32	0.15	0.13	0.14	0.15	0.26	0.33	0.58
Años	22	23	22	22	21	22	22	22	20	20	20	20

Concentraciones máximas de sólidos en suspensión al ingreso – salida del desarenador

Ingreso al desarenador - Concentraciones máximas

Al respecto, se ha realizado la recopilación de concentraciones de suspensión máximas concentraciones de sedimentos en suspensión de manera mensual; por espacio de 20 años de muestreos; las mayores concentraciones se encuentran en la época de avenidas: enero (25.48 gr/l), febrero (13.90 gr/l), marzo (20.98 gr/l), abril (16.34 gr/l) y mayo (10.56 gr/l). Salida del desarenador - Concentraciones máximas

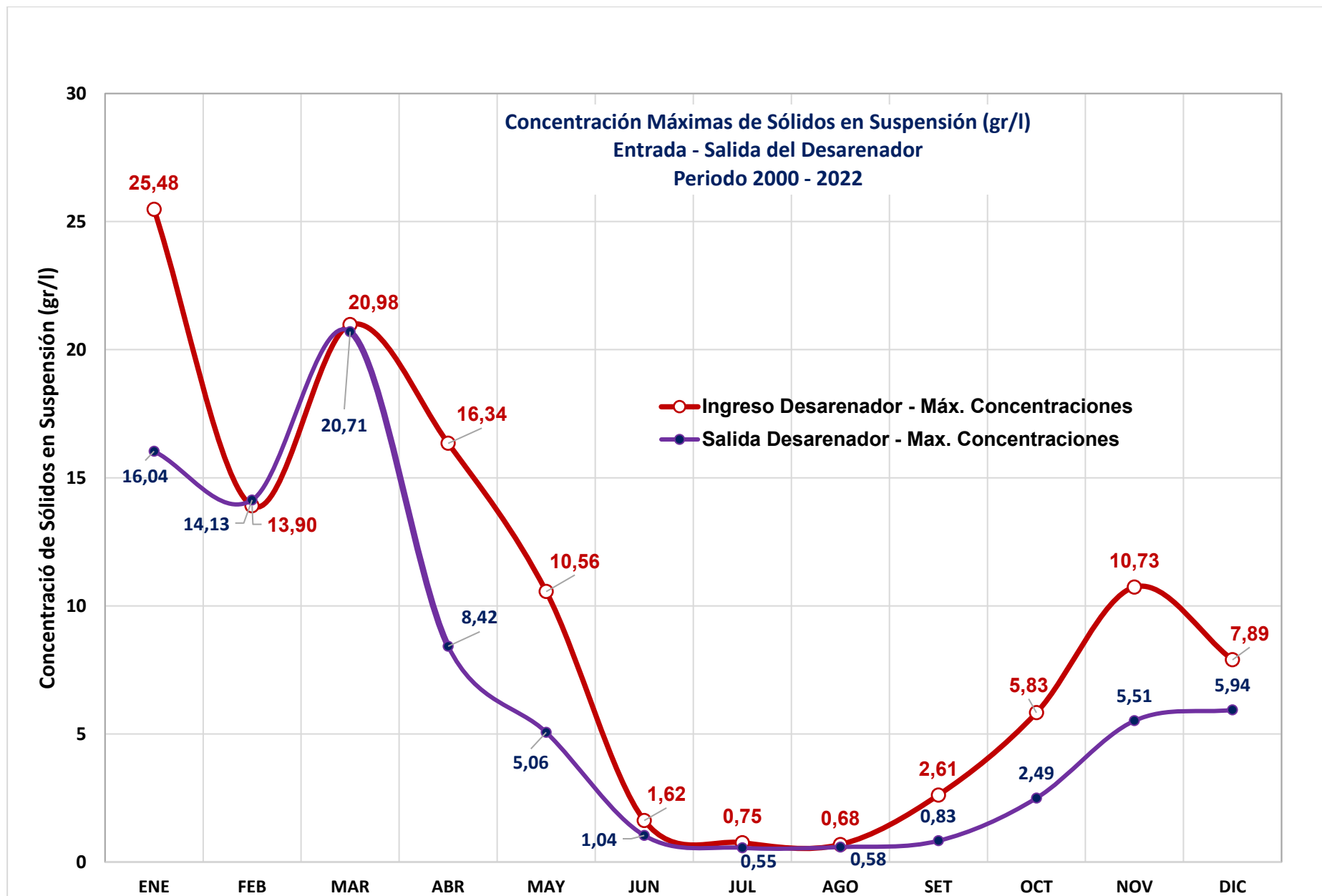
La carga sólida máxima de sólidos en suspensión que ingresa al sistema hidráulico del Proyecto Especial Chavimochic es: enero (16.04 gr/l), febrero (14.13 gr/l), marzo (20.71 gr/l), abril (8.42 gr/l) y mayo (5.06 gr/l).

Ingreso Desarenador - Concentración Máximas de Sólidos en suspensión (gr/l)

Ingreso a Desarenador												
Concentración Máximas de sedimentos en suspensión (gr/l)												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	3.84	8.35	17.59	9.44	3.53	0.54	0.41	0.51	1.06	0.51	2.51	7.23
2001	25.48	12.30	20.98	8.92	4.17	0.61	0.69	0.43	0.62	2.30	10.73	6.31
2002	2.36	10.00	20.87	8.86	0.33	1.56	0.33	0.29	0.32	5.83	7.75	7.89
2003	2.52	8.72	8.69	4.03	1.22	0.40	0.36	0.38	0.41	0.80	0.62	4.49
2004	1.44	4.30	6.17	2.20	0.95	0.31	0.33	0.29	0.77	2.82	6.66	2.40
2005	2.96	7.02	6.40	2.99	0.66	0.13	0.15	0.15		0.89	0.44	2.67
2006	4.87	13.90	10.07	13.77		1.62	0.13	0.17	0.36	1.37	1.87	1.05
2007	5.54	5.44	6.40	9.36	2.28	0.57	0.24	0.24	0.25	1.30	1.59	3.51
2008	4.59	5.59	6.35	4.74	5.83	0.65	0.25	0.36	0.39			
2009	6.22	7.97	7.92	9.15	1.20	0.39	0.21	0.18	0.27	2.54	5.92	7.61
2010	2.50	5.04	3.74	16.34	10.56	0.40	0.44	0.66	0.82	0.95	3.80	3.52
2011	6.88	3.49	5.15	8.69	1.59	0.22	0.75	0.36	0.40	0.59	1.83	4.57
2012	3.29	12.10	5.62	6.47	1.46	0.27	0.16	0.30	0.47	1.08	2.18	2.80
2013	1.51	6.24	10.70	3.11	1.17	0.68	0.32	0.60	0.33	2.93	0.85	3.49
2014	1.82	8.01	10.78	5.22	2.35	0.13	0.23	0.31	0.29	0.56	0.66	3.57
2015	5.98	2.58	9.24	4.68	2.08	0.22	0.12	0.10	0.14	0.71	1.08	4.14
2016	2.95	4.48	4.91	2.62	0.20	0.16	0.20	0.17	0.25	1.91	0.24	1.03
2017	3.04	4.12	12.73	6.12	1.32	0.32	0.15	0.14	0.56	0.60	0.32	1.92
2018	2.06	2.70	5.63	8.08	0.98	0.20	0.12	0.13	0.13	0.65	1.03	2.85
2019	6.88	5.05	6.87	4.55	0.43	0.16	0.17	0.18	0.41	1.22	0.98	3.83
2020	2.09	1.00										
2021	0.21	4.70	1.86	0.98	0.23	0.24	0.26	0.68	2.61	2.42	4.04	
2022	1.11	3.12	6.43	4.07	0.35	0.56	0.30	0.48				
Max	25.48	13.90	20.98	16.34	10.56	1.62	0.75	0.68	2.61	5.83	10.73	7.89

Salida Desarenador - Concentración Máximas de Sólidos en suspensión (gr/l)

Salida del Desarenador Concentración Máximas de sedimentos en suspensión (gr/l)												
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	1.63	5.07	16.18	4.95	2.74	0.58	0.36	0.40	0.83	0.51	1.25	5.94
2001	16.04	11.38	15.65	5.70	0.35	0.27	0.41	0.37	0.52	0.43	0.55	2.20
2002	0.21	4.81	20.71	4.57	0.28	0.32	0.28	0.22	0.18	1.19	5.51	4.60
2003	1.81	3.63	2.95	0.88	0.87	0.29	0.19	0.33	0.24	0.34	0.26	1.52
2004	0.34	4.30	5.68	1.68	0.69	0.29	0.31	0.26	0.34	2.49	4.71	1.42
2005	2.09	3.90	5.04	2.89	0.33	0.13	0.13	0.13		0.53	0.24	1.36
2006	2.39	5.70	7.18	8.42		1.04	0.11	0.17	0.30	0.92	0.63	0.65
2007	4.24	3.42	4.69	6.92	1.91	0.53	0.23	0.17	0.23	1.07	1.15	2.69
2008	3.66	4.06	6.32	4.62	4.06	0.68	0.25	0.25	0.40			
2009	4.62	6.82	5.79	5.92	0.89	0.34	0.17	0.16	0.19	1.78	3.58	3.90
2010	2.38	4.48	1.90	6.63	2.48	0.20	0.29	0.58	0.42	0.58	1.61	2.51
2011	2.85	2.02	3.24	4.96	0.62	0.22	0.55	0.24	0.25	0.48	1.80	3.15
2012	2.85	14.13	7.42	5.23	1.58	0.23	0.13	0.17	0.24	1.33	1.36	1.40
2013	1.06	3.76	8.91	1.68	5.06	0.45	0.17	0.26	0.22	1.53	0.62	2.22
2014	1.72	6.85	5.45	2.07	1.70	0.12	0.19	0.22	0.23	0.39	0.74	2.31
2015	3.43	2.15	9.30	3.16	2.36	0.20	0.11	0.10	0.11	0.57	1.35	2.56
2016	2.28	4.34	4.20	1.60	0.19	0.11	0.22	0.14	0.10	0.86	0.15	0.84
2017	2.96	3.40	8.62	5.24	0.94	0.27	0.12	0.14	0.34	0.43	0.19	1.69
2018	4.89	2.22	3.80	6.94	0.75	0.17	0.10	0.12	0.11	0.61	1.07	2.84
2019	4.28	3.40	4.68	3.03	0.40	0.14	0.14	0.13	0.27	0.73	0.86	2.07
2020	1.65	1.03										
2021		0.09	0.44	0.12	0.13	0.02	0.05	0.07	0.07	0.11	0.07	0.07
2022	1.00	1.99	4.82	4.04	0.26	0.25	0.19	0.52				
Max	16.04	14.13	20.71	8.42	5.06	1.04	0.55	0.58	0.83	2.49	5.51	5.94



Ingreso de carga sólida al sistema hidráulico

El monitoreo de los sedimentos en suspensión, se ha realizado por el laboratorio de sedimentos, en el periodo 2000 – 2022. Para el análisis del presente estudio se ha descartado 05 años (2005, 2006, 2008, 2020, 2021 y 2022); por problemas: falta de información en algunos meses por falta de personal técnico.

La carga de sedimentos anual se ha establecido a lo largo de 22 años, los que han sido y son monitoreados durante los 12 meses del año. En estos registros, se han presentado algunos inconvenientes, por lo que han sido descartados.

A continuación, se adjunta tablas correspondientes al Ingreso – Salida del desarenador en función al volumen del sedimento (hm^3/mes y hm^3/mes) y una gráfica resumen del sedimento acumulativo anualmente. Al respecto se observa para el año 2000(1.098 hm^3), 2001(1.252 hm^3), 2009(1.233 hm^3) y 2012(1.210 hm^3) por mencionar los máximos.

También se adjunta información en función a su carga sólida (ton/año) y su respectiva grafica resumen de sedimento acumulativo: 2000($1,271,180 \text{ ton}$), 2001($1,460,994 \text{ ton}$), 2009($1,429,035 \text{ ton}$) y 2012($1,402,845 \text{ ton}$). Ver gráfico Carga sólida del desarenador (ton/año).

Salida de carga solida a la salida del desarenador (sedimento que ingresa al sistema hidráulico

La carga de sedimentos ($\text{hm}^3/\text{año}$ y ton/año), mensual y anual se adjunta en las siguientes tablas y una gráfica resumen.

La siguiente información de los sedimentos en suspensión que salen del desarenador y corresponde al sedimento que ingresa a la infraestructura del P.E. Chavimochic son: 2000(0.284 hm^3), 2001(0.378 hm^3), 2009(0.640 hm^3) y 2012(0.541 hm^3) por mencionar los máximos.

La misma información en función a ton/año : 2000($302,864 \text{ ton}$), 2001($404,232 \text{ ton}$), 2009($683,029 \text{ ton}$) y 2012($571,097 \text{ ton}$). Ver gráfico Carga sólida del desarenador (ton/año).

Purga de la carga solida del desarenador

La siguiente información de los sedimentos en suspensión correspondiente a la purga del desarenador: 2000($968,316 \text{ ton}$), 2001($1,056,762 \text{ ton}$), 2009($746,006 \text{ ton}$) y 2012($831,748 \text{ ton}$). Ver gráfico Carga sólida del desarenador (ton/año).

Ingreso de sedimentos en suspensión al Desarenador (hm³/mes)

Ingreso de sedimentos al desarenador (hm³/mes)													
Año	Densidad (ton/m³)	1.204	1.147	1.147	1.145	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.191	1.125
	Acumulado (hm³/año)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	1.098	0.034	0.215	0.344	0.145	0.045	0.026	0.017	0.021	0.028	0.015	0.115	0.094
2001	1.252	0.338	0.202	0.414	0.090	0.024	0.010	0.010	0.009	0.014	0.020	0.078	0.043
2002	0.950	0.018	0.074	0.241	0.100	0.010	0.027	0.009	0.009	0.005	0.111	0.241	0.106
2003	0.513	0.046	0.120	0.139	0.066	0.012	0.011	0.010	0.010	0.010	0.014	0.015	0.060
2004	0.444	0.025	0.075	0.059	0.034	0.017	0.014	0.013	0.011	0.015	0.037	0.080	0.063
2007	0.888	0.117	0.070	0.240	0.210	0.029	0.017	0.011	0.009	0.009	0.049	0.078	0.049
2009	1.233	0.149	0.229	0.279	0.227	0.030	0.013	0.009	0.008	0.009	0.077	0.070	0.133
2010	0.781	0.048	0.097	0.114	0.155	0.063	0.013	0.019	0.016	0.020	0.023	0.049	0.165
2011	1.005	0.148	0.100	0.136	0.337	0.031	0.014	0.016	0.016	0.013	0.022	0.039	0.134
2012	1.210	0.170	0.345	0.253	0.249	0.048	0.015	0.010	0.007	0.006	0.015	0.055	0.038
2013	0.624	0.039	0.117	0.258	0.057	0.049	0.007	0.008	0.006	0.007	0.014	0.014	0.048
2014	0.667	0.108	0.055	0.246	0.110	0.039	0.008	0.005	0.005	0.006	0.013	0.019	0.054
2015	0.382	0.029	0.100	0.118	0.048	0.009	0.007	0.008	0.007	0.006	0.017	0.010	0.022
2016	0.609	0.061	0.084	0.207	0.129	0.040	0.008	0.007	0.006	0.009	0.012	0.007	0.039
2017	0.535	0.054	0.041	0.155	0.143	0.029	0.007	0.005	0.005	0.004	0.013	0.026	0.052
2018	0.681	0.063	0.162	0.210	0.074	0.012	0.007	0.006	0.006	0.008	0.015	0.019	0.099
2019	1.098	0.034	0.215	0.344	0.145	0.045	0.026	0.017	0.021	0.028	0.015	0.115	0.094
Max	1.252	0.338	0.345	0.414	0.337	0.063	0.027	0.019	0.021	0.028	0.111	0.241	0.165
Min	0.382	0.018	0.041	0.059	0.034	0.009	0.007	0.005	0.005	0.004	0.012	0.007	0.022
Promedio	0.804	0.090	0.130	0.213	0.136	0.031	0.013	0.010	0.009	0.011	0.029	0.057	0.075

Fuente. Elaboración propia.

Salida de sedimentos en suspensión del Desarenador (hm³/mes)

Salida de sedimentos en suspensión del Desarenador (hm³/mes)													
Año	Densidad (ton/m³)	1.125	1.006	1.058	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176	1.176	1.055
	Acumulado (hm³/año)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	0.284	0.009	0.064	0.090	0.031	0.013	0.006	0.004	0.007	0.009	0.007	0.009	0.036
2001	0.378	0.097	0.062	0.156	0.027	0.003	0.003	0.005	0.005	0.007	0.004	0.001	0.007
2002	0.151	0.003	0.021	0.062	0.011	0.003	0.005	0.004	0.004	0.003	0.006	0.015	0.012
2003	0.097	0.012	0.014	0.017	0.011	0.004	0.004	0.003	0.006	0.005	0.005	0.005	0.011
2004	0.196	0.007	0.041	0.026	0.014	0.008	0.006	0.006	0.006	0.007	0.018	0.037	0.020
2007	0.320	0.039	0.027	0.086	0.083	0.017	0.008	0.005	0.004	0.004	0.013	0.018	0.016
2009	0.640	0.076	0.132	0.160	0.115	0.016	0.006	0.004	0.004	0.005	0.025	0.029	0.068
2010	0.306	0.030	0.048	0.048	0.063	0.021	0.006	0.007	0.008	0.007	0.009	0.015	0.043
2011	0.350	0.039	0.035	0.050	0.113	0.010	0.007	0.006	0.005	0.004	0.008	0.016	0.059
2012	0.541	0.039	0.188	0.122	0.100	0.020	0.005	0.005	0.004	0.004	0.011	0.024	0.019
2013	0.372	0.024	0.073	0.152	0.030	0.028	0.003	0.005	0.004	0.005	0.007	0.008	0.032
2014	0.444	0.058	0.037	0.185	0.070	0.027	0.005	0.003	0.003	0.004	0.008	0.012	0.032
2015	0.267	0.022	0.080	0.085	0.029	0.006	0.004	0.004	0.004	0.003	0.009	0.005	0.016
2016	0.434	0.044	0.062	0.153	0.094	0.025	0.005	0.005	0.005	0.006	0.009	0.004	0.023
2017	0.388	0.050	0.031	0.111	0.103	0.022	0.005	0.003	0.003	0.002	0.009	0.015	0.036
2018	0.456	0.043	0.116	0.142	0.050	0.008	0.005	0.004	0.003	0.004	0.009	0.013	0.060
2019	0.284	0.009	0.064	0.090	0.031	0.013	0.006	0.004	0.007	0.009	0.007	0.009	0.036
Max	0.640	0.097	0.188	0.185	0.115	0.028	0.008	0.007	0.008	0.009	0.025	0.037	0.068
Min	0.097	0.003	0.014	0.017	0.011	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.004	0.001	0.007
Promedio	0.352	0.037	0.064	0.103	0.059	0.014	0.005	0.005	0.005	0.005	0.010	0.014	0.031

Fuente. Elaboración propia.

Desarenador – Ingreso de sedimentos en suspensión (ton/mes)

Ingreso del desarenador (ton/mes)													
Año	Acumulado (ton/año)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	1,271,180	40,375	247,040	393,949	166,242	54,003	31,203	20,429	24,553	32,759	17,374	137,246	106,006
2001	1,460,994	406,506	231,490	474,276	102,713	29,017	11,409	12,336	10,939	17,249	24,222	92,509	48,330
2002	1,106,488	21,199	85,199	276,275	114,649	12,295	32,362	10,627	10,904	5,408	131,717	287,058	118,797
2003	593,137	55,165	137,202	159,817	76,042	14,702	12,886	11,820	11,807	11,793	16,864	17,564	67,475
2004	517,313	30,338	85,451	67,713	39,503	19,772	16,372	16,018	13,551	17,888	44,550	94,781	71,375
2007	1,032,955	140,521	80,236	274,995	240,402	35,013	20,010	12,605	10,534	11,091	58,915	93,079	55,555
2009	1,429,035	179,978	262,579	319,685	259,600	35,701	16,045	10,692	9,428	10,726	91,720	83,372	149,507
2010	903,591	58,111	110,889	130,181	177,693	75,161	15,219	22,144	19,389	23,618	27,859	57,927	185,400
2011	1,163,696	178,444	114,699	156,015	385,485	36,730	16,571	18,514	18,465	15,523	26,090	46,718	150,440
2012	1,402,845	204,452	395,163	290,499	285,439	57,250	17,577	11,747	7,867	6,651	18,460	65,300	42,440
2013	720,734	47,168	134,265	295,618	65,634	57,930	7,745	9,832	7,373	7,819	16,284	16,535	54,531
2014	773,485	129,904	63,418	281,936	125,434	46,001	9,021	5,969	5,855	7,190	15,353	22,626	60,778
2015	442,080	35,252	115,196	135,866	55,427	10,670	8,909	9,126	7,874	7,242	20,346	11,756	24,416
2016	705,201	73,466	96,419	237,714	148,235	47,274	10,035	7,915	7,638	10,877	14,058	8,052	43,518
2017	618,717	64,672	47,306	177,197	163,744	34,982	8,825	5,569	6,410	4,869	15,428	30,732	58,984
2018	785,523	76,213	185,369	240,347	84,422	14,862	8,447	7,635	6,926	9,849	17,970	22,549	110,932
2019	1,271,180	40,375	247,040	393,949	166,242	54,003	31,203	20,429	24,553	32,759	17,374	137,246	106,006
Max	1,460,994.41	406,505.80	395,162.75	474,275.61	385,485.31	75,160.59	32,362.42	22,144.40	24,553.36	32,759.02	131,716.78	287,057.61	185,400.15
Min	442,079.79	21,198.76	47,305.97	67,713.41	39,503.34	10,670.35	7,745.43	5,568.76	5,855.12	4,869.35	14,058.34	8,052.42	24,416.06
Promedio	932,935.81	108,860.09	149,495.03	244,505.22	155,666.62	36,335.25	15,164.78	12,061.13	11,219.61	12,534.53	34,825.58	67,987.74	84,280.25

Fuente. Elaboración propia.

Salida al Desarenador de sedimentos en suspensión (ton/mes)

Salida de sedimentos al sistema hidráulico (ton/mes) del desarenador													
Año	Acumulado (ton/año)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	302,864	10,401	64,039	94,008	32,957	14,900	6,710	4,370	7,645	10,337	8,375	10,730	38,390
2001	404,232	109,434	62,265	161,780	29,029	3,719	4,068	6,139	6,245	8,168	4,191	1,471	7,725
2002	162,269	3,391	21,564	64,910	12,006	3,984	6,340	4,931	4,459	3,031	6,815	18,125	12,713
2003	106,642	13,302	14,177	18,131	11,567	4,904	5,156	3,511	7,226	5,649	5,908	5,843	11,266
2004	216,005	7,610	41,630	27,553	14,579	9,726	6,804	7,314	6,998	7,724	21,314	43,572	21,184
2007	346,396	44,337	27,170	89,192	87,395	19,599	9,523	6,228	4,706	4,460	15,679	20,973	17,135
2009	683,029	85,151	133,276	166,118	121,215	18,822	7,490	5,214	4,707	5,643	29,982	33,857	71,554
2010	331,289	33,838	48,372	50,405	67,098	25,119	6,965	8,616	8,851	8,404	10,218	17,910	45,493
2011	376,939	44,049	34,760	51,592	119,242	11,648	7,888	6,744	6,381	5,165	9,025	18,500	61,947
2012	571,097	44,049	188,894	126,483	106,269	23,736	6,386	5,332	4,408	4,191	13,126	28,225	19,998
2013	395,713	27,479	73,073	157,987	31,935	32,392	4,005	6,201	5,235	5,564	8,252	9,940	33,650
2014	475,302	65,687	36,888	192,878	74,005	31,805	5,766	3,533	3,346	4,337	9,313	13,865	33,879
2015	282,097	24,242	80,365	88,770	31,036	6,571	5,177	4,725	4,309	4,057	10,238	6,085	16,522
2016	462,728	49,499	62,365	158,767	99,794	28,915	5,780	5,446	5,716	6,553	10,106	5,229	24,558
2017	417,407	56,300	31,350	115,650	108,464	25,769	5,316	3,313	3,116	2,774	10,175	17,542	37,639
2018	481,768	48,369	116,860	147,341	53,202	9,830	5,541	4,250	3,690	4,439	10,034	14,745	63,465
2019	302,864	10,401	64,039	94,008	32,957	14,900	6,710	4,370	7,645	10,337	8,375	10,730	38,390
Max	683,028.93	109,433.79	188,893.96	192,878.16	121,214.54	32,391.92	9,523.08	8,615.64	8,851.46	10,336.70	29,982.04	43,571.87	71,554.34
Min	106,641.53	3,390.98	14,177.30	18,131.19	11,567.21	3,719.31	4,005.00	3,313.00	3,115.60	2,773.96	4,190.62	1,470.86	7,725.11
Promedio	375,986.16	41,696.13	64,815.53	106,972.91	62,487.10	16,964.82	6,182.24	5,366.61	5,439.87	5,655.95	11,422.00	16,663.21	32,319.79

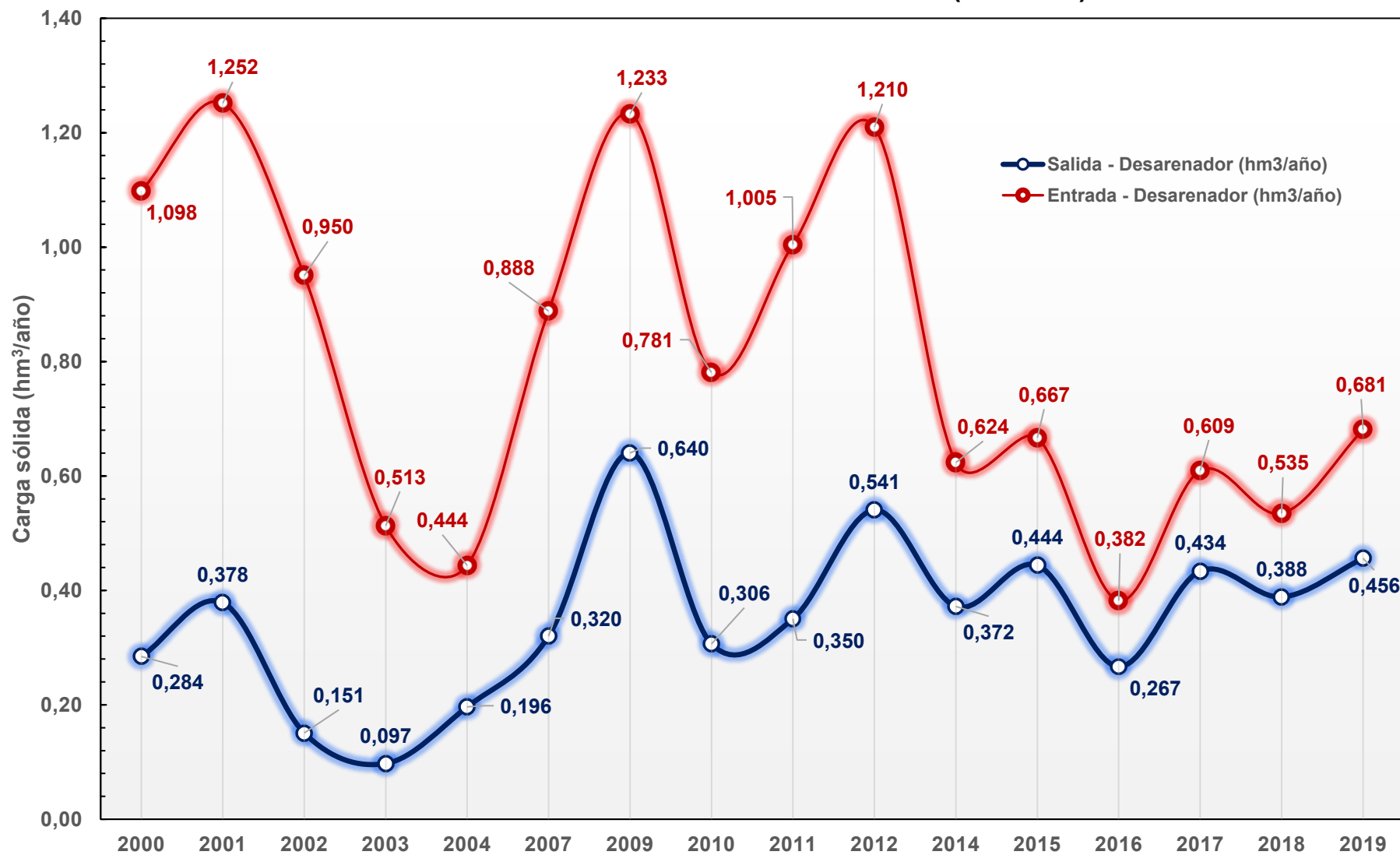
Fuente. Elaboración propia.

Purga del desarenador de sedimentos en suspensión (ton/mes)

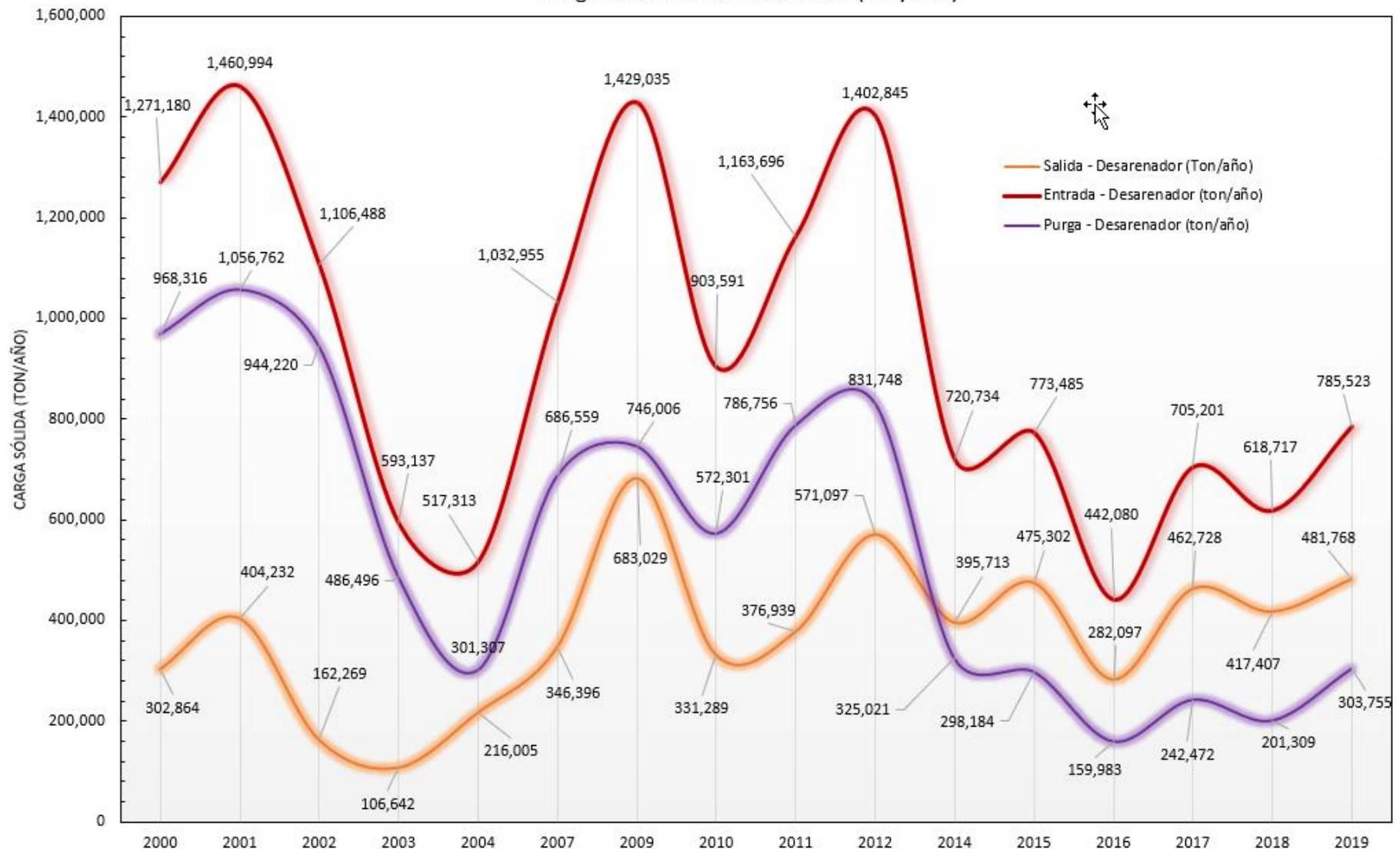
Purga del desarenador de sedimentos en suspensión al sistema hidráulico (ton/mes)													
Año	Acumulado (ton/año)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	968,316	29,974	183,000	299,941	133,286	39,104	24,493	16,059	16,908	22,422	8,998	126,516	67,616
2001	1,056,762	297,072	169,226	312,496	73,684	25,298	7,341	6,197	4,694	9,081	20,031	91,038	40,604
2002	944,220	17,808	63,634	211,365	102,643	8,311	26,022	5,696	6,445	2,377	124,902	268,933	106,083
2003	486,496	41,863	123,025	141,686	64,475	9,797	7,730	8,309	4,581	6,144	10,955	11,721	56,209
2004	301,307	22,728	43,822	40,160	24,925	10,046	9,568	8,704	6,553	10,165	23,236	51,209	50,191
2007	686,559	96,184	53,065	185,803	153,007	15,414	10,487	6,378	5,828	6,631	43,236	72,105	38,420
2009	746,006	94,826	129,302	153,567	138,386	16,879	8,555	5,478	4,721	5,083	61,738	49,515	77,953
2010	572,301	24,272	62,516	79,776	110,595	50,042	8,253	13,529	10,537	15,214	17,641	40,018	139,908
2011	786,756	134,395	79,939	104,423	266,243	25,082	8,684	11,771	12,084	10,358	17,065	28,218	88,494
2012	831,748	160,403	206,269	164,015	179,170	33,515	11,191	6,415	3,459	2,460	5,334	37,075	22,442
2013	325,021	19,688	61,192	137,631	33,699	25,538	3,740	3,631	2,138	2,255	8,033	6,595	20,881
2014	298,184	64,217	26,531	89,058	51,429	14,196	3,255	2,436	2,510	2,854	6,040	8,760	26,899
2015	159,983	11,010	34,831	47,096	24,391	4,099	3,733	4,401	3,565	3,184	10,108	5,671	7,894
2016	242,472	23,967	34,055	78,946	48,441	18,359	4,254	2,469	1,922	4,324	3,952	2,823	18,960
2017	201,309	8,372	15,956	61,547	55,279	9,213	3,508	2,256	3,294	2,095	5,253	13,190	21,345
2018	303,755	27,844	68,509	93,006	31,220	5,032	2,906	3,385	3,236	5,410	7,935	7,804	47,467
2019	968,316	29,974	183,000	299,941	133,286	39,104	24,493	16,059	16,908	22,422	8,998	126,516	67,616
Max	1,056,762.08	297,072.01	206,268.79	312,495.97	266,243.11	50,042.04	26,022.31	16,058.80	16,907.97	22,422.32	124,901.59	268,933.02	139,907.51
Min	159,982.53	8,371.98	15,955.71	40,160.14	24,390.86	4,098.93	2,905.91	2,255.76	1,921.70	2,095.39	3,952.46	2,823.29	7,894.33
Promedio	556,949.65	67,163.96	84,679.50	137,532.30	93,179.51	19,370.43	8,982.54	6,694.53	5,779.73	6,878.57	23,403.58	51,324.53	51,960.46

Fuente. Elaboración propia.

Volumen de sedimentos - Desarenador (hm³/año)



Carga sólida del desarenador (ton/año)



Porcentajes de sólidos en suspensión – salida del desarenador

El % de carga sólida a la salida del desarenador se presenta entre enero a abril correspondiente (70% de los sólidos totales en suspensión); 20% en estiaje entre mayo a octubre y 10% de sólidos restantes entre los meses de noviembre a diciembre. Ver Tabla y gráfico.

Salida del Desarenador - % Acumulativos

Mes	2000			2001		
	Cargo (ton)	%	Acum.	Cargo (ton)	%	Acum.
Ene	10,401.221	3.43	3.43	109,433.79	27.072	27.072
Feb	64,039.270	21.14	24.58	62,264.66	15.403	42.475
Mar	94,008.246	31.04	55.62	161,779.64	40.021	82.497
Abr	32,956.515	10.88	66.50	29,029.24	7.181	89.678
May	14,899.758	4.92	71.42	3,719.31	0.920	90.598
Jun	6,710.491	2.22	73.64	4,067.94	1.006	91.604
Jul	4,370.172	1.44	75.08	6,138.63	1.519	93.123
Ago	7,645.389	2.52	77.60	6,244.76	1.545	94.668
Set	10,336.697	3.41	81.02	8,167.76	2.021	96.688
Oct	8,375.288	2.77	83.78	4,190.62	1.037	97.725
Nov	10,730.500	3.54	87.32	1,470.86	0.364	98.089
Dic	38,390.000	12.68	100.00	7,725.11	1.911	100.000
Total	302,863.547	100.00		404,232	100.00	

En la siguiente tabla, se muestra la carga sólida acumulada mes a mes, durante un ciclo hidrológico de 14 años de monitoreo de sedimentos en suspensión, claramente se observa 02 fases bien definidas.

Primera fase – Avenidas. Corresponde entre noviembre a abril (06 meses), los sólidos acumulados representan un 80% de toda la masa sólida.

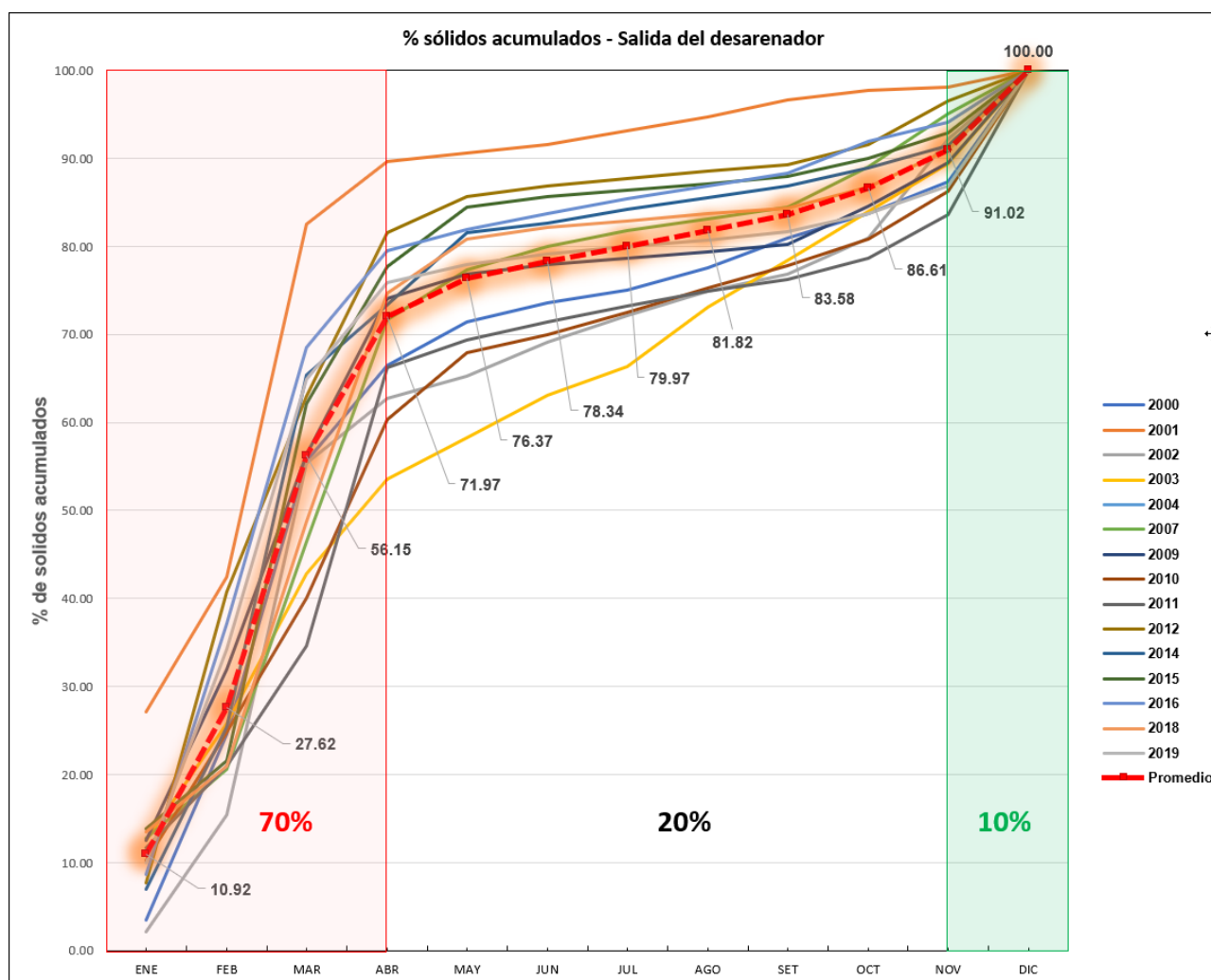
Segunda fase – Estiaje. Corresponde entre mayo a octubre (06 meses), los sólidos acumulados representan un 20% de toda la masa sólida.

Tabla. Porcentajes de sólidos mensual acumulativo – Salida del desarenador

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	3.43	24.58	55.62	66.50	71.42	73.64	75.08	77.60	81.02	83.78	87.32	100.00
2001	27.07	42.48	82.50	89.68	90.60	91.60	93.12	94.67	96.69	97.73	98.09	100.00

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2002	2.09	15.38	55.38	62.78	65.23	69.14	72.18	74.93	76.80	81.00	92.17	100.00
2003	12.47	25.77	42.77	53.62	58.22	63.05	66.34	73.12	78.42	83.96	89.44	100.00
2007	12.80	20.64	46.39	71.62	77.28	80.03	81.83	83.18	84.47	89.00	95.05	100.00
2009	12.47	31.98	56.30	74.05	76.80	77.90	78.66	79.35	80.18	84.57	89.52	100.00
2010	10.21	24.82	40.03	60.28	67.87	69.97	72.57	75.24	77.78	80.86	86.27	100.00
2011	11.69	20.91	34.59	66.23	69.32	71.41	73.20	74.89	76.26	78.66	83.57	100.00
2012	7.71	40.79	62.94	81.54	85.70	86.82	87.75	88.52	89.26	91.56	96.50	100.00
2014	6.94	25.41	65.34	73.41	81.59	82.60	84.17	85.49	86.90	88.98	91.50	100.00
2015	13.82	21.58	62.16	77.73	84.42	85.64	86.38	87.08	88.00	89.96	92.87	100.00
2016	8.59	37.08	68.55	79.55	81.88	83.72	85.39	86.92	88.36	91.99	94.14	100.00
2018	13.49	21.00	48.71	74.69	80.86	82.14	82.93	83.68	84.34	86.78	90.98	100.00
2019	10.04	34.30	64.88	75.92	77.96	79.11	80.00	80.76	81.68	83.77	86.83	100.00
Promedio	10.92	72.62	56.15	71.97	76.37	78.34	79.97	81.82	83.58	86.61	91.02	100.00

En la siguiente figura se muestra el porcentaje de sedimentos acumulado anualmente a la Salida del desarenador.



Porcentajes de sólidos en suspensión – Ingreso al desarenador

La siguiente tabla e imagen, representa la carga sólida acumulada mes a mes y anualmente que ingresa al desarenador, y corresponde a 14 años de monitoreo.

Primera fase – Avenidas. Corresponde entre noviembre a abril (06 meses), los sólidos acumulados representan un 80% de toda la masa sólida.

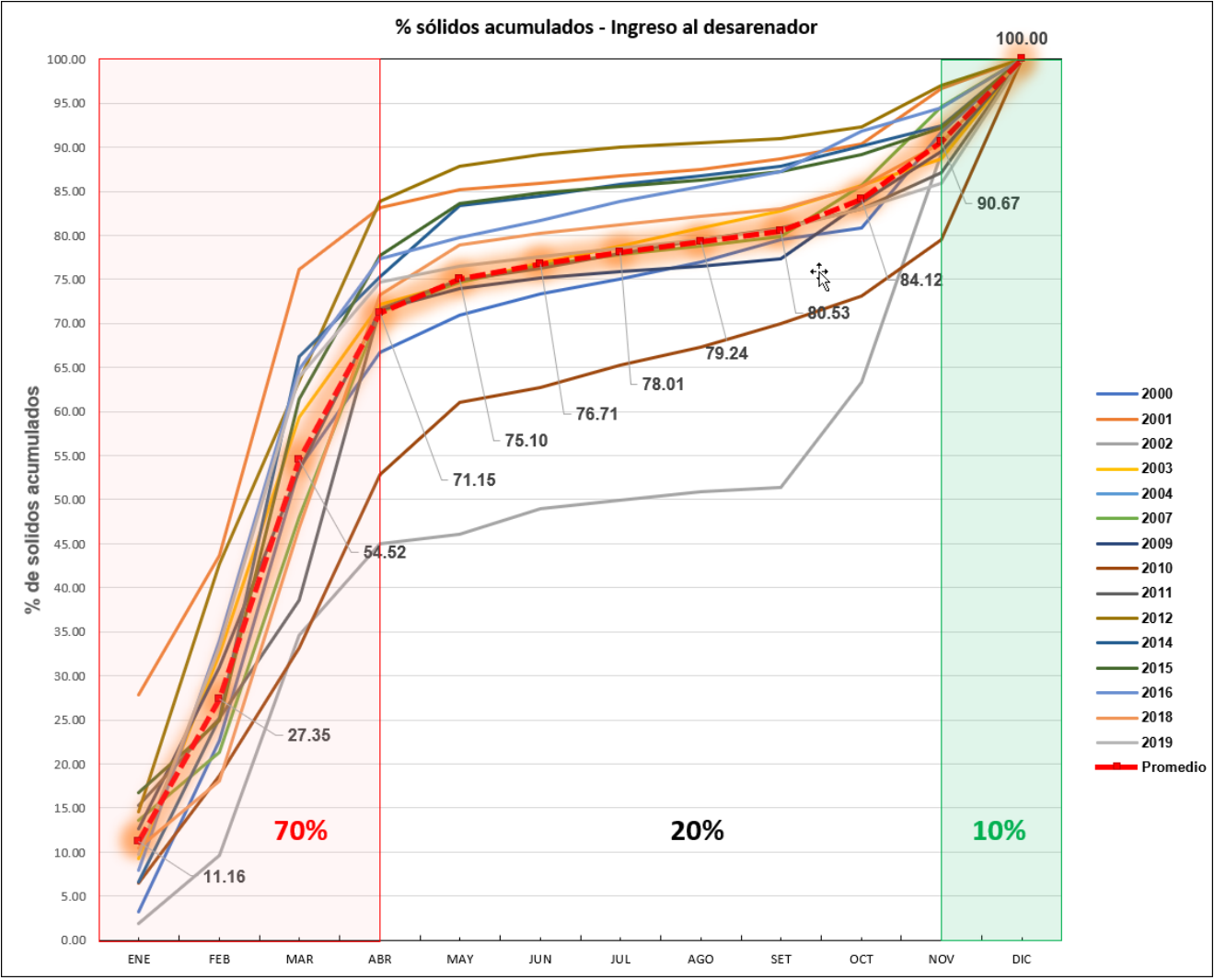
Segunda fase – Estiaje. Corresponde entre mayo a octubre (06 meses), los sólidos acumulados representan un 20% de toda la masa sólida.

La siguiente gráfica, va a determinar las frecuencias de muestreo que debe realizar el laboratorio de sedimentos; por ejemplo, en la fase de avenidas incrementar la frecuencia de sedimentos en suspensión (tanto en la salida y entrada del

desarenador); en la fase de estiaje reducir al máximo los muestreos por cuanto las concentraciones y la carga de sólidos es casi constante. Asimismo, establecer que meses puede utilizar funcionar una planta de floculación con la finalidad de incrementar la eficiencia del desarenador, y a su vez reducir la carga de sólidos en suspensión a la salida del desarenador, la finalidad es reducir la carga de sólidos que pueda ingresar a la futura Presa Palo Redondo y aumentar su horizonte hidráulico de la presa (menor volumen muerto en un mayor tiempo de funcionamiento).

Tabla x. Porcentajes de sólidos mensual acumulativo – Ingreso al desarenador

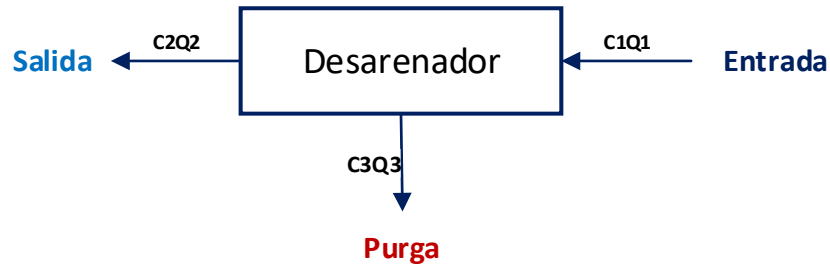
Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
2000	3.18	22.61	53.60	66.68	70.93	73.38	74.99	76.92	79.50	80.86	91.66	100.00
2001	27.82	43.67	76.13	83.16	85.15	85.93	86.77	87.52	88.70	90.36	96.69	100.00
2002	1.92	9.62	34.58	44.95	46.06	48.98	49.94	50.93	51.42	63.32	89.26	100.00
2003	9.30	32.43	59.38	72.20	74.68	76.85	78.84	80.83	82.82	85.66	88.62	100.00
2007	13.60	21.37	47.99	71.27	74.66	76.59	77.81	78.83	79.91	85.61	94.62	100.00
2009	12.59	30.97	53.34	71.51	74.00	75.13	75.88	76.53	77.29	83.70	89.54	100.00
2010	6.43	18.70	33.11	52.78	61.09	62.78	65.23	67.37	69.99	73.07	79.48	100.00
2011	15.33	25.19	38.60	71.72	74.88	76.30	77.89	79.48	80.82	83.06	87.07	100.00
2012	14.57	42.74	63.45	83.80	87.88	89.13	89.97	90.53	91.00	92.32	96.97	100.00
2014	6.54	25.17	66.19	75.30	83.33	84.41	85.77	86.80	87.88	90.14	92.43	100.00
2015	16.79	24.99	61.44	77.66	83.61	84.77	85.55	86.30	87.23	89.22	92.14	100.00
2016	7.97	34.03	64.77	77.30	79.72	81.73	83.80	85.58	87.22	91.82	94.48	100.00
2018	10.45	18.10	46.74	73.20	78.86	80.28	81.18	82.22	83.01	85.50	90.47	100.00
2019	9.70	33.30	63.90	74.64	76.54	77.61	78.58	79.47	80.72	83.01	85.88	100.00
Promedio	11.16	27.35	54.52	71.15	75.10	76.71	78.01	79.24	80.53	84.12	90.67	100.00



Eficiencia del desarenador

La eficiencia del desarenador está en función a la cantidad de sólidos en suspensión evacuados y retornados al río Santa. Es decir:

Balance de masa



En el balance de masa tener en cuenta que no existe ningún tipo de reacción química, entonces se tiene:

$$\text{Sólidos (entrada)} = \text{Sólidos (salida)} + \text{Sólidos (purga)} \dots\dots\dots(1)$$

Además:

$$\text{Sólidos} = \text{Concentración de sólidos en suspensión} \times \text{Caudal} \dots\dots\dots(2)$$

Luego:

$$\begin{aligned} \text{Sólidos (purga)} &= \text{Sólidos (entrada)} - \text{Sólidos (salida)} \\ &\dots\dots\dots(3) \end{aligned}$$

$$C3Q3 = C1Q1 - C2Q2$$

$$\text{eficiencia (Ef)} = \frac{\text{sólidos (purga)}}{\text{sólidos (entrada)}}$$

$$\text{Ef (\%)} = \frac{C1Q1 - C2Q2}{C1Q1}$$

Donde:

C1. Concentración de sedimentos en suspensión – Entrada del desarenador

Q1. Caudal de ingreso al desarenador

C2. Concentración de sedimentos en suspensión – Salida del desarenador

Q2. Caudal de salida del desarenador

Las concentraciones de sedimentos en suspensión y caudales de entrada y salida son registradas diariamente, esta información es base para determinar la eficiencia promedio anual del desarenador. La figura siguiente indica un rendimiento máximo de 85.33% (2002) y un mínimo de 28.42% (2020).

La gráfica que se muestra a continuación se elabora teniendo en cuenta los valores mostrados en el cuadro, que, a su vez, se elabora siguiendo la siguiente metodología:

1°. Calcular las cargas sólidas del ingreso y salida del desarenador. Es decir, multiplicando las concentraciones de sedimentos en suspensión (C1 y C2) por el caudal de ingreso y salida (Q1 y Q2) correspondientemente.

2°. A continuación, se aplica la fórmula de eficiencia del desarenador como se ha indicado líneas arriba.

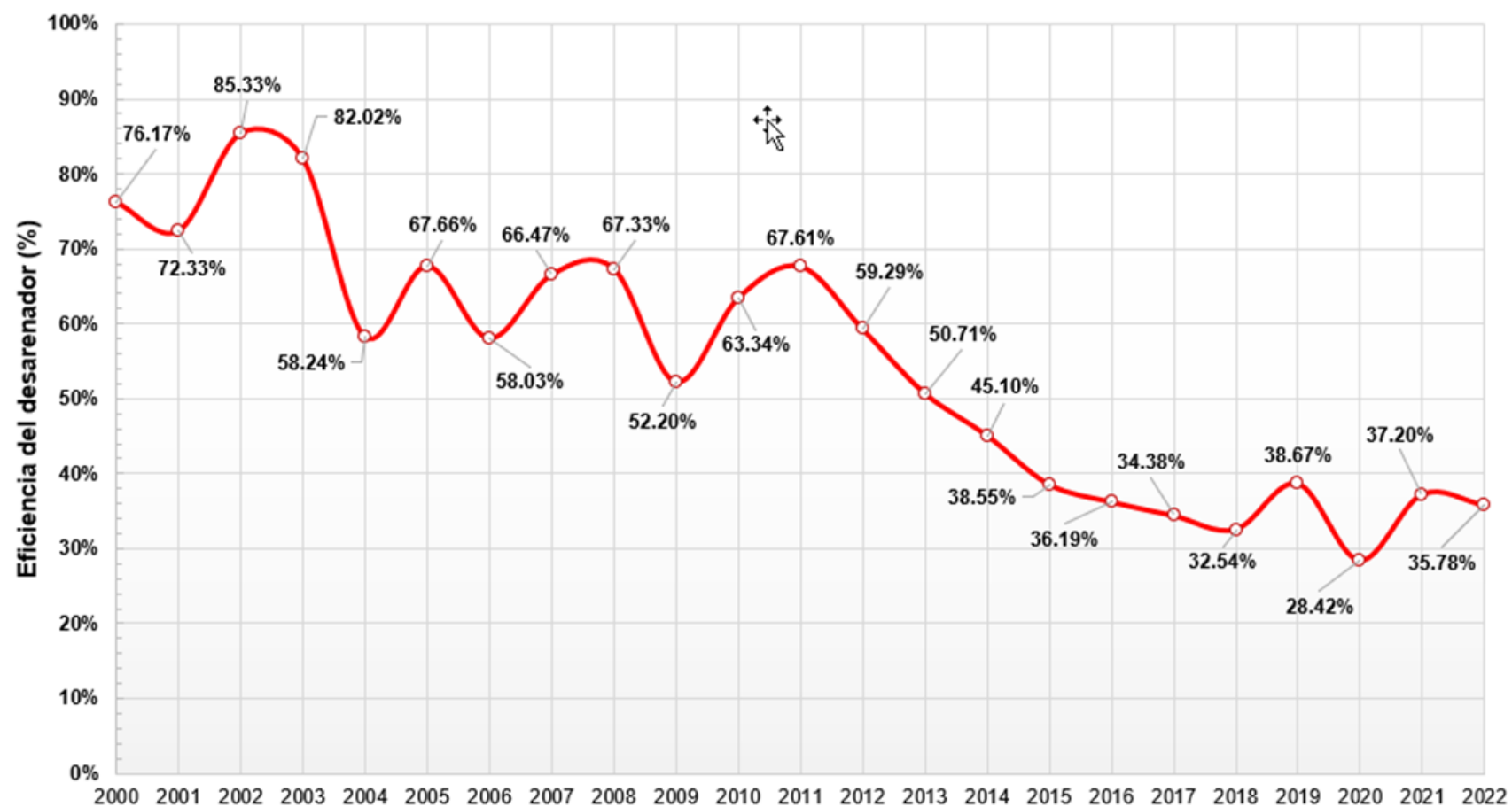
$$Ef (\%) = \frac{C1Q1 - C2Q2}{C1Q1}$$

3°. Las eficiencias son diarias, después se hace un resumen de eficiencias mensuales; para la curva se toma el valor promedio anual.

Año	Rendimiento	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
2000	76.17%	57.54	71.57	73.46	75.24	72.50	78.30	74.63	65.01	67.49	51.62	92.14	55.50
2001	72.33%	71.41	73.94	66.89	78.70	84.64	63.40	49.83	42.19	51.00	80.14	98.34	85.34
2002	85.33%	76.16	77.09	81.73	89.51	59.25	64.74	53.36	59.15	43.61	91.31	94.07	89.40
2003	82.02%	69.57	91.35	89.09	75.11	67.29	59.11	68.63	38.94	51.33	61.02	64.46	77.45
2004	58.24%	66.96	49.29	58.20	60.12	48.45	58.34	54.30	48.34	52.39	46.94	52.80	66.31
2005	67.66%	63.51	66.09	68.76	66.63	60.30	57.72	35.87	37.41		54.64	52.00	60.61
2006	58.03%	57.50	58.95	45.63	61.56		62.10	63.32	65.93	67.18	68.37	73.12	
2007	66.47%	68.59	64.09	66.02	58.10	44.07	51.92	50.42	54.34	60.28	65.87	74.24	65.11
2008	67.33%	68.68	68.45	65.12	66.31	66.60	66.02	67.07		46.88			
2009	52.20%	49.14	47.27	47.28	53.26	46.16	51.03	50.61	49.41	46.54	55.03	50.59	49.28
2010	63.34%	42.78	53.08	57.53	50.88	55.18	52.94	58.35	54.51	63.35	60.56	59.07	71.79
2011	67.61%	71.08	66.57	64.97	68.41	61.47	51.79	62.62	64.69	65.93	64.46	60.89	57.31
2012	59.29%	78.79	53.46	54.75	61.68	55.57	60.55	54.29	39.87	30.76	33.50	47.76	46.51

2013	50.71%	53.82	48.97	49.37	51.99	37.49	47.54	41.39	48.57		50.63	53.98	49.39
2014	45.10%	43.25	42.66	43.00	44.23	43.15	46.63	31.02	27.60	26.32	40.21	40.53	34.68
2015	38.55%	46.26	39.69	33.93	38.85	32.30	35.94	41.26	42.67	38.61	38.07	34.32	34.95
2016	36.19%	29.22	30.73	34.73	39.74	37.45	42.30	48.34	45.26	40.41	42.94	46.19	32.37
2017	34.38%	31.99	33.75	33.06	33.42	36.19	41.05	30.87	20.68	37.26	26.28	33.79	40.07
2018	32.54%	20.90	32.71	31.61	31.44	26.00	38.32	39.75	50.67	44.06	35.75	41.51	36.51
2019	38.67%	31.54	34.32	36.88	33.97	30.23	33.30	43.35	44.84	51.80	40.66	31.16	37.54
2020	28.42%	25.89	29.02										
2021	37.20%								24.98				
2022	35.78%	34.67	38.60	31.41	34.88	35.73	45.87	34.44	43.84				

Eficiencia del desarenador (%) - Promedio Anual



MODELAMIENTO DE LOS ESCENARIOS

PRIMER ESCENARIO

Determinar el volumen muerto de la presa Palo Redondo, en 10, 25, 50, 75 y 100 años con diferentes eficiencias de retención en la presa Palo Redondo, teniendo en cuenta el funcionamiento hidráulico y eficiencia del desarenador. Considerar la eficiencia de retención promedio de la presa en (40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90% y 95%). No adicionar ningún tipo de floculante al ingreso del desarenador.

Características Generales

Las consideraciones para determinar el aporte de sólidos en suspensión que ingrese a la presa Palo Redondo son las siguientes:

- 1°. La presa Palo Redondo es del tipo lateral ya que la ubicación no está en el eje del río. Se ubica en la quebrada Palo Redondo, situado a la margen derecha del río Santa, aguas abajo de la Bocatoma del Proyecto Especial Chavimochic.
- 2°. La carga de sólidos es exclusivamente de sólidos en suspensión; ya que los sólidos de arrastre del río Santa son eliminados en su totalidad en la captación (Bocatoma CHAVIMOCHIC), canal Desripador (0+500) y la Pre-purga del desarenador.
- 3°. El desarenador retira en su totalidad los sólidos en suspensión hasta diámetros mayores a 0.15 mm, el resto de los sólidos en suspensión está conformado de limos y arcillas que ingresarían a la presa Palo Redondo.
- 4°. Los análisis de sedimentos por difracción de Rayos X efectuados en INGEMMET, detallan que los sedimentos muestreados en las naves del desarenador están conformados en promedio, principalmente en un 87% de cuarzo.
- 5°. El laboratorio sedimentológico del Proyecto Especial Chavimochic (campamento San José) dispone del equipo necesario para los monitoreos de caudales (m^3/s) y concentraciones de sólidos en suspensión (gr/l) del ingreso y salida del desarenador, que son los principales puntos de control para determinar el volumen muerto. Para efectuar los cálculos respectivos se tiene información desde 2000 - 2022. Algunos años han sido descartados por errores en la cadena de monitoreo y cálculos correspondientes.
- 6°. Actualmente no existe un estudio definitivo sobre la eficiencia de retención de la Presa Palo Redondo; el doctor Rocha recomienda un 66.66% de eficiencia de retención; el Ing. Huber Vergara Díaz, recomienda una eficiencia de retención del 80

%; por lo mencionado anteriormente, para los cálculos del volumen muerto se ha estimado de manera conservadora un 85% de eficiencia de retención; en razón que, el canal de alimentación a la presa se encuentra muy cerca al eje de la presa (aproximadamente 500 m) y su velocidad de entrega al canal madre está en un promedio de 25 m/s; con ello el tiempo de residencia del volumen de agua se estima demasiado corto para eficiencias de retención mayores a 90% ni menores al 85%.

En vista que no existen eficiencias de retención que indiquen su valor real y teniendo en cuenta que es un proyecto en ejecución (pero actualmente paralizado) se ha calculado el volumen muerto de la presa para eficiencias de retención entre 40% - 95%; diferentes años de funcionamiento (10, 25, 50, 85 y 100) y con la información proporcionada por el PECH.

Entonces, por recomendación de la literatura de diferentes presas en el mundo, es adecuado considerar el intervalo entre 85% - 95% de eficiencia de retención de la presa y esto va a determinar el rango del volumen muerto. Asimismo, hay que tener en cuenta que todo volumen muerto agregado a la presa se encuentra principalmente en su modo de operación del sistema hidráulico; es decir eficiencia en la captación (bocatoma), eficiencia en el desarenador y el tiempo de retención del agua en la presa (esto es función del volumen de ingreso, demanda de los valles y el funcionamiento de la central hidroeléctrica de pie de presa)

- 7°. Para determinar las densidades del Volumen Muerto en la presa, en un horizonte de 100 años, se ha seguido la Metodología de la Bureau of Reclamation (Design of Small Dams – Appendix A: Reservoir Sedimentation).
- 8°. Los sedimentos por intrusión de arenas eólicas al vaso de la presa se considera cero; la razón es que la cantidad de arenas eólicas que ingresa al vaso con relación al volumen muerto es despreciable.
- 9°. Para el cálculo de sedimentos de arrastre y suspensión de la quebrada Palo Redondo, se toma como referencia los cálculos realizados en el Estudio de Factibilidad del Embalse Palo Redondo: Volumen II: Hidrología y Sedimentos.
- 10°. Los caudales de alimentación (Ingreso) al embalse Palo Redondo, está en función de la oferta hídrica del río Santa. Asimismo, el suministro de agua a los terrenos agrícolas considerados como parte de este proyecto, en su tercera etapa (empleando

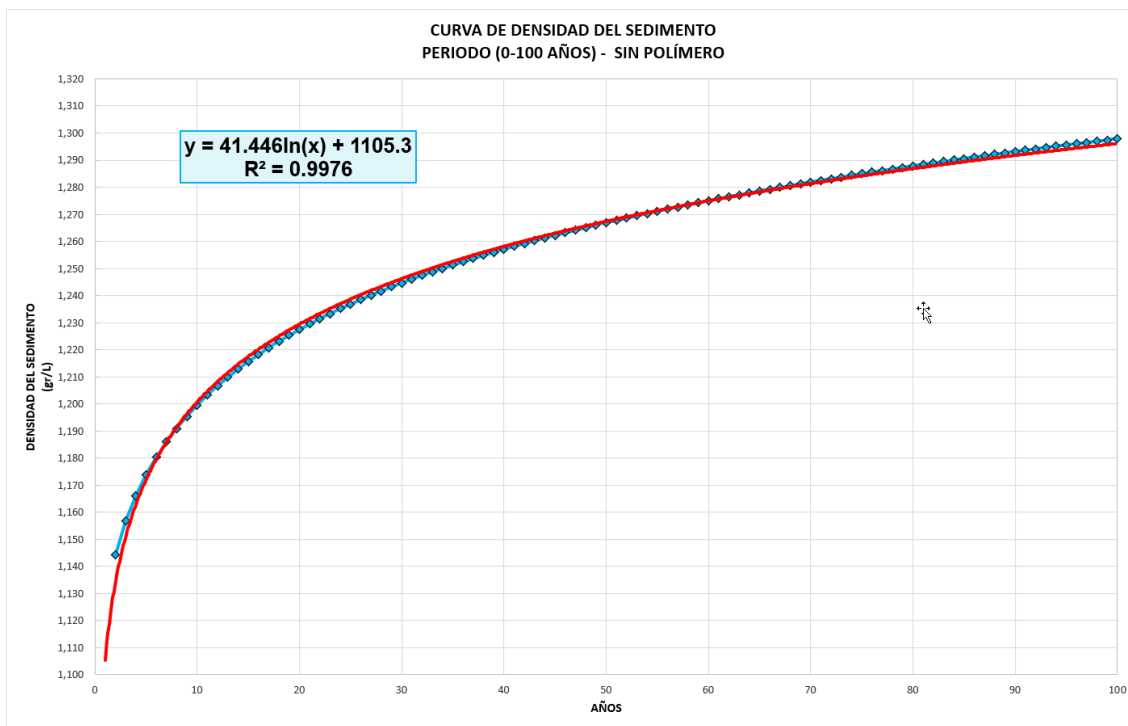
el túnel de restitución (Salida)), está en función al Plan de Cultivo para las áreas nuevas y las licencias y permisos vigentes, para las áreas agrícolas existentes, para un periodo de 100 años.

11°. El llenado de volumen de operación de la presa se ha previsto hacerlo en 6 meses (diciembre, enero, febrero, marzo, abril y mayo) con un caudal aproximado de 82 m³/s.

12°. Los sedimentos en suspensión que ingresarían y saldrían de la presa serán del tipo cohesivo (sedimentos de arcillas y limos).

Cálculo de la función de la velocidad de sedimentación sin floculantes

Se ha empleado la metodología adoptada por Bureau of Reclamation (Design of Small Dams – Appendix A: Reservoir Sedimentation);



La ecuación para un periodo de 100 años es la siguiente:

$$y(\text{densidad}) = 41.446 \ln(t) + 1105.3 \quad (R^2 = 0.9976)$$

para un tiempo de 100 años se tendrá una densidad de 1,296.17 gr/l.

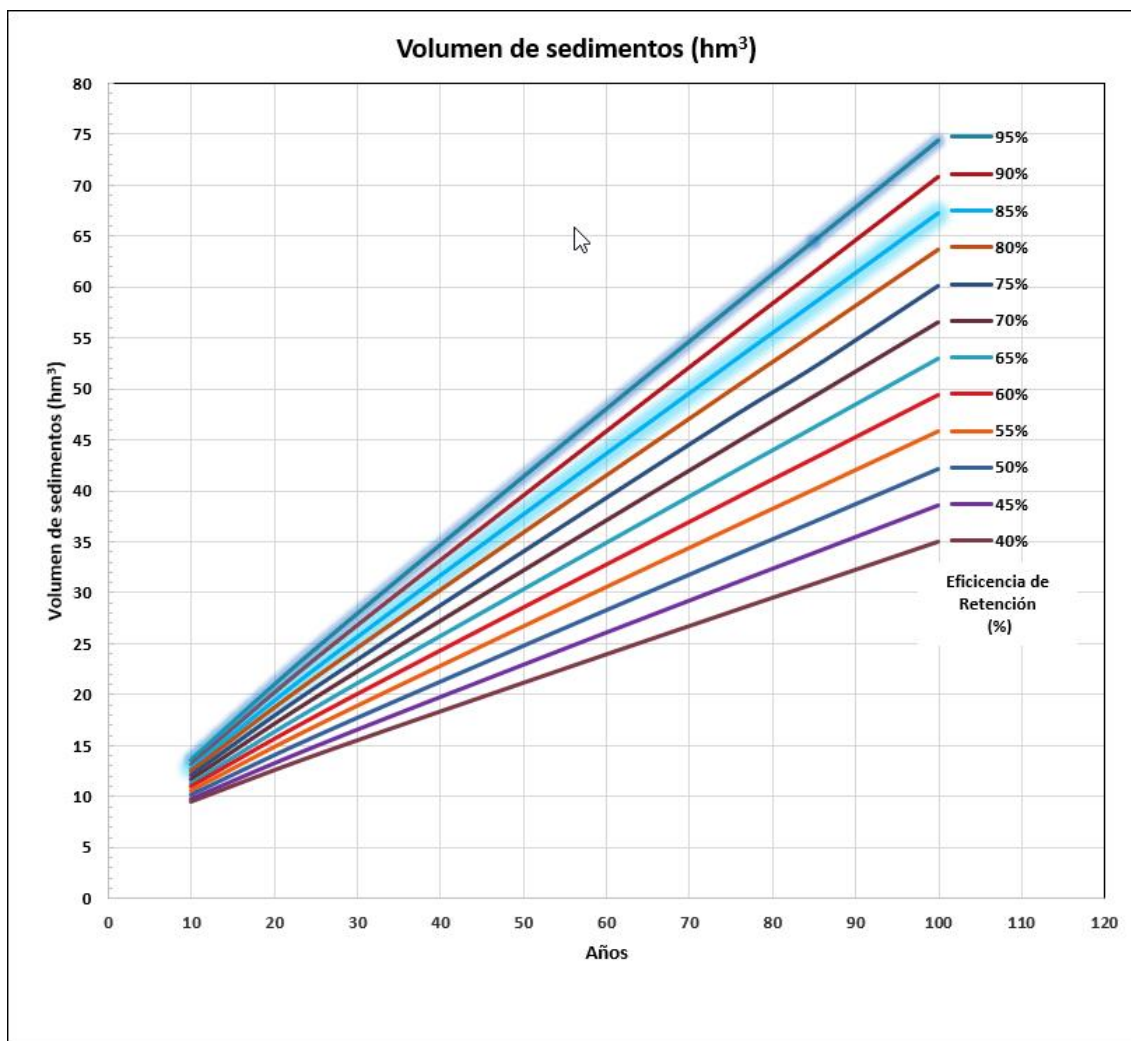
En el cuadro que se presenta a continuación, se muestran los resultados de los volúmenes de sedimentos que se depositarían en el embalse Palo Redondo, para diferentes periodos de funcionamiento de esta estructura (100, 85, 75, 50, 25 y 10 años), para diferentes densidades promedios y para diferentes eficiencias de retención del embalse:

Determinación del volumen muerto en función al tiempo de operación, densidades del sedimento y eficiencias de retención - floculante

Volumen muerto en función al tiempo de operación, densidades del sedimento y eficiencias de retención

Años	100	85	75	50	25	10
Densidad	1,297.93	1,290.58	1,284.96	1,266.90	1,236.86	1,199.49
Efic. Ret. (%)	Volumen de sedimentos (hm³)					
40	35.04	30.88	28.12	21.13	14.02	9.43
45	38.62	33.94	30.83	22.97	14.97	9.81
50	42.20	37.00	33.55	24.81	15.93	10.19
55	45.78	40.06	36.26	26.65	16.88	10.57
60	49.36	43.12	38.98	28.49	17.83	10.95
65	52.94	46.18	41.69	30.33	18.79	11.33
70	56.52	49.24	44.41	32.17	19.74	11.71
75	60.10	52.10	47.12	34.01	20.69	12.08
80	63.68	55.36	49.84	35.86	21.64	12.46
85	67.26	58.42	52.55	37.70	22.60	12.84
90	70.84	61.48	55.27	39.54	23.55	13.22
95	74.42	64.54	57.98	41.38	24.50	13.60

Del cuadro anterior se determina que, para un periodo de operación de 50 años, con una densidad promedio de 1,266.90 l/s y una eficiencia de retención de la presa del orden del 85%; el volumen muerto sería de 37.70 Hm³.



Asimismo, de la tabla anterior, para una eficiencia de retención del 85%, y un tiempo de 50 años (37.70 hm³), 75 años (52.55 hm³) y 100 años (67.26 hm³).

Años	100	85	75	50	25	10
Densidad	1,297.93	1,290.58	1,284.96	1,266.90	1,236.86	1,199.49
Efic. Ret. (%)	Volumen de sedimentos (hm ³)					
	V = 401 hm ³ (Volumen de diseño de la presa Palo Redondo)					
85%	16.77	14.57	13.10	9.40	5.64	3.20
90%	17.67	15.33	13.78	9.86	5.87	3.30
95%	18.56	16.09	14.46	10.32	6.11	3.39

De la tabla anterior, se puede indicar, para una eficiencia de retención al 85% en los 10 primeros años de funcionamiento se tendría 3.20% (12.84 hm³) de sedimentos del

volumen total de la presa. A los 100 años el 16.77% (67.26 hm^3) del volumen total de la presa. ($67.26/401 \times 100 = 16.77$) y así sucesivamente.

Para una eficiencia de retención al 95%; en los 10 primeros años se tendría un 3.39%, 50 años (10.32%) y 100 años (18.56%). Para 100 años ($74.42/401 \times 100 = 18.56\%$).

Esta proyección es válida, siempre y cuando el desarenador tenga buenas eficiencias; excelente control en el manejo de los sedimentos; en este escenario no se considera el uso de floculante al ingreso del desarenador.

SEGUNDO ESCENARIO

Determinar el volumen muerto de la presa Palo Redondo, en 10, 25, 50, 75 y 100 años con diferentes eficiencias de retención en la presa Palo Redondo, teniendo en cuenta el funcionamiento hidráulico y eficiencia del desarenador. Considerar la eficiencia de retención promedio de la presa en (40%, 45%, 50%, 55%, 60%, 65%, 70%, 75%, 80%, 85%, 90% y 95%). Adicionar floculante al ingreso del desarenador.

Características generales

Las condiciones son las mismas al primer escenario; sin embargo, se adicionará floculante al ingreso del desarenador con el objetivo de acelerar la sedimentación (mejorar la eficiencia del desarenador y procesar grandes volúmenes de agua).

Es necesario mencionar que, para el proceso de llenado de la Presa Palo Redondo en la fase de operación, es necesario ingresar la máxima captación del desarenador 82 m³/s (avenidas), estos elevados volúmenes de agua traerían consigo reducir la eficiencia del desarenador; e ingresaría a la presa material con granulometría no cohesiva (arenas).

En los años 2004 (marzo, abril, mayo, junio) y 2005 (enero a junio) se adicionó floculante al ingreso del desarenador con los siguientes resultados, que se muestran en el cuadro:

Concentración promedio de sedimentos en suspensión de entrada (IN) y salida (OUT) de Desarenador durante los años 2004 y 2005

5.2.2.1 Concentración promedio de sedimentos en suspensión de entrada (IN) y salida (OUT) de Desarenador (2004)

N°	Marzo - 2004			Abril - 2004			Mayo - 2004			Octubre - 2004			Noviembre - 2004			Diciembre - 2004		
	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%
1	0.207	0.143	69%	0.353	0.225	64%	0.273	0.226	83%	0.689	0.200	29%	1.172	0.499	43%	0.314	0.254	81%
2	0.172	0.114	66%	0.480	0.183	38%	0.280	0.198	71%	0.447	0.177	40%	1.234	0.581	47%	0.592	0.324	55%
3	0.158	0.085	54%	0.613	0.198	32%	0.266	0.221	83%	1.088	0.212	19%	1.249	0.512	41%	0.819	0.378	46%
4	0.191	0.133	70%	1.065	0.232	22%	0.223	0.179	80%	0.731	0.200	27%	1.169	0.761	65%	0.943	0.120	13%
5	0.179	0.127	71%	0.548	0.239	44%	0.241	0.163	67%	0.644	0.218	34%	3.295	2.131	65%	0.695	0.324	47%
6	0.199	0.118	59%	0.385	0.192	50%	0.312	0.181	58%	0.457	0.196	43%	2.552	1.278	50%	1.466	0.162	11%
7	1.118	0.190	17%	0.439	0.207	47%	0.381	0.213	56%	0.329	0.203	62%	2.600	1.208	46%	0.851	0.208	24%
8	1.161	0.226	19%	0.345	0.229	66%	0.270	0.172	64%	0.328	0.222	68%	4.940	2.101	43%	2.291	0.311	14%
9	0.524	0.147	28%	0.329	0.247	75%	0.289	0.177	61%	0.333	0.212	64%	4.501	1.031	23%	1.319	0.366	28%
10	0.478	0.143	30%	0.462	0.223	48%	0.203	0.173	85%	0.279	0.209	75%	6.661	0.989	15%	1.842	0.521	28%
11	0.489	0.219	45%	1.225	0.343	28%	0.394	0.199	50%	0.280	0.123	44%	3.639	1.016	28%	2.404	0.646	27%
12	0.317	0.179	56%	0.986	0.229	23%	0.269	0.187	69%	0.230	0.105	46%	2.138	0.788	37%	1.473	0.620	42%
13	0.217	0.124	57%	1.105	0.318	29%	0.222	0.195	88%	0.252	0.179	71%	2.238	1.025	46%	1.821	0.214	12%
14	0.233	0.146	62%	2.205	0.352	16%	0.212	0.173	82%	0.247	0.190	77%	1.401	0.427	30%	1.175	0.635	54%
15	0.262	0.191	73%	2.052	0.691	34%	0.198	0.147	74%	0.222	0.168	76%	0.927	0.370	40%	1.585	1.246	79%
16	0.231	0.149	65%	1.450	0.414	29%	0.193	0.113	59%	0.237	0.210	88%	0.677	0.266	39%	1.815	1.569	86%
17	0.292	0.157	54%	0.846	0.253	30%	0.214	0.198	92%	0.238	0.230	97%	0.532	0.369	69%	2.025	1.105	55%
18	0.274	0.191	70%	0.649	0.203	31%	0.218	0.182	83%	0.322	0.234	73%	0.456	0.355	78%	1.312	0.503	38%
19	0.967	0.333	34%	0.491	0.188	38%	0.277	0.221	80%	0.406	0.263	65%	0.431	0.363	84%	1.047	0.306	29%
20	1.425	0.457	32%	0.330	0.187	57%	0.322	0.151	47%	0.966	0.224	23%	0.355	0.216	61%	0.832	0.330	40%
21	1.772	0.406	23%	0.275	0.142	52%	0.284	0.196	69%	1.484	0.291	20%	0.405	0.291	72%	0.626	0.263	42%
22	2.030	0.526	26%	0.291	0.158	54%	0.255	0.160	63%	0.858	0.396	46%	0.508	0.357	70%	0.698	0.204	29%
23	1.533	0.499	33%	0.283	0.200	71%	0.257	0.150	58%	0.603	0.285	47%	0.760	0.430	57%	0.518	0.220	42%

N°	Marzo - 2004			Abril - 2004			Mayo - 2004			Octubre - 2004			Noviembre - 2004			Diciembre - 2004		
	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%
24	2.648	0.295	11%	0.271	0.192	71%	0.228	0.155	68%	1.542	0.514	33%	0.394	0.300	76%	0.386	0.425	110%
25	6.167	0.553	9%	0.250	0.176	70%	0.220	0.203	92%	2.816	0.424	15%	0.307	0.273	89%	0.336	0.297	88%
26	4.287	0.397	9%	0.306	0.155	51%	0.216	0.125	58%	1.663	0.499	30%	0.278	0.260	93%	0.290	0.198	68%
27	1.443	0.676	47%	0.296	0.114	38%	0.212	0.140	66%	0.883	0.303	34%	0.325	0.266	82%	0.303	0.177	58%
28	0.875	0.604	69%	0.318	0.140	44%	0.951	0.206	22%	0.613	0.240	39%	0.568	0.279	49%	0.405	0.193	48%
29	0.577	0.405	70%	0.233	0.177	76%	0.353	0.185	52%	1.007	0.433	43%	0.535	0.316	59%	0.499	0.140	28%
30	0.492	0.184	37%	0.276	0.214	78%	0.231	0.148	64%	1.390	0.348	25%	0.468	0.278	59%	0.508	0.162	32%
31	0.373	0.183	49%				0.277	0.210	76%	1.188	0.362	30%				0.660	0.181	27%
			46%			47%			68%			48%			55%			45%

$$\text{Porcentaje (\%)} = \frac{\text{Concentración que sale del desarenador (OUT)}}{\text{Concentración que ingresa al desareandor (IN)}} \times 100$$

5.2.2.2 Concentración promedio de sedimentos en suspensión de entrada (IN) y salida (OUT) de Desarenador (2005)

N°	Ene - 2005			Feb - 2005			Mar - 2005			Abr - 2005			May - 2005			Jun - 2005		
	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%
1	0.368	0.269	73%	0.473	0.173	37%	0.275	0.912	30%	2.667	0.414	16%	0.424	0.131	31%	0.099	0.066	67%
2	0.365	0.235	64%	0.257	0.215	84%	0.598	1.419	42%	2.992	1.617	54%	0.440	0.164	37%	0.113	0.066	58%
3	0.370	0.187	50%	0.228	0.126	55%	0.292	1.215	24%	2.757	1.796	65%	0.258	0.152	59%	0.108	0.085	79%
4	0.473	0.359	76%	0.256	0.204	80%	1.377	2.719	51%	2.043	0.484	24%	0.262	0.140	53%	0.108	0.082	76%
5	1.108	0.475	43%	0.207	0.185	89%	0.703	2.126	33%	1.295	0.462	36%	0.155	0.087	56%	0.110	0.041	37%
6	2.076	0.354	17%	0.168	0.127	75%	0.464	1.472	31%	1.193	0.325	27%	0.206	0.096	47%	0.106	0.076	72%
7	2.957	0.293	10%	0.184	0.119	65%	1.706	3.183	54%	0.914	0.327	36%	0.184	0.107	58%	0.134	0.081	60%
8	0.817	0.183	22%	0.273	0.192	70%	0.421	2.136	20%	1.034	0.568	55%	0.100	0.078	79%	0.122	0.069	57%
9	1.522	0.276	18%	0.647	0.207	32%	0.729	2.011	36%	0.598	0.335	56%	0.148	0.067	45%	0.134	0.103	77%
10	0.935	0.326	35%	0.499	0.160	32%	0.544	1.890	29%	0.540	0.415	77%	0.169	0.084	50%	0.120	0.078	65%
11	0.947	0.269	28%	4.890	1.268	26%	3.918	4.221	93%	0.490	0.383	78%	0.118	0.083	71%	0.084	0.060	71%
12	0.673	0.247	37%	2.745	0.253	9%	1.915	3.551	54%	0.659	0.381	58%	0.096	0.078	81%	0.080	0.047	59%
13	1.426	0.314	22%	3.696	2.124	57%	0.503	2.554	20%	0.588	0.352	60%	0.105	0.084	80%	0.091	0.078	85%
14	2.719	0.735	27%	7.023	1.706	24%	1.019	3.039	34%	0.532	0.279	52%	0.089	0.058	65%	0.099	0.079	80%
15	1.681	0.201	12%	3.503	0.707	20%	1.440	3.042	47%	0.409	0.308	75%	0.156	0.043	28%	0.080	0.077	96%
16	0.850	0.408	48%	2.992	0.716	24%	0.708	2.928	24%	0.340	0.210	62%	0.123	0.080	65%	0.089	0.080	90%
17	0.584	0.248	42%	1.745	0.267	15%	1.182	2.595	46%	0.283	0.180	64%	0.159	0.106	66%	0.100	0.071	71%
18	0.390	0.098	25%	1.341	0.195	15%	4.788	5.424	88%	0.292	0.176	60%	0.148	0.086	58%	0.104	0.071	68%
19	0.301	0.129	43%	0.969	0.228	23%	2.309	6.061	38%	0.382	0.250	65%	0.081	0.061	76%	0.096	0.080	83%
20	0.255	0.144	56%	0.884	0.184	21%	1.286	3.712	35%	0.926	0.329	36%	0.064	0.034	53%	0.130	0.075	57%
21	0.234	0.194	83%	1.481	0.493	33%	4.349	6.402	68%	0.909	0.153	17%	0.127	0.046	36%	0.118	0.102	87%
22	0.196	0.132	67%	2.583	1.271	49%	0.674	3.324	20%	1.119	0.258	23%	0.102	0.049	48%	0.118	0.086	73%
23	0.164	0.145	88%	1.870	0.377	20%	0.729	2.158	34%	0.999	0.407	41%	0.082	0.039	47%	0.115	0.106	92%

N°	Ene - 2005			Feb - 2005			Mar - 2005			Abr - 2005			May - 2005			Jun - 2005		
	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%	IN	OUT	%
24	0.190	0.146	77%	1.020	0.293	29%	1.177	1.973	60%	0.476	0.238	50%	0.097	0.071	74%	0.132	0.079	60%
25	0.253	0.147	58%	1.114	0.214	19%	1.466	1.931	76%	0.349	0.202	58%	0.097	0.064	67%	0.119	0.073	61%
26	1.302	0.446	34%	0.598	0.213	36%	0.923	1.542	60%	0.402	0.296	74%	0.092	0.063	68%	0.118	0.066	56%
27	1.254	0.259	21%	0.526	0.366	70%	1.146	1.624	71%	0.445	0.157	35%	0.656	0.092	14%	0.127	0.082	65%
28	0.460	0.240	52%	0.809	0.644	80%	1.772	4.629	38%	0.548	0.139	25%	0.133	0.089	67%			
29	0.364	0.176	48%				0.837	3.988	21%	0.324	0.143	44%	0.123	0.090	73%			
30	0.296	0.177	60%				0.947	3.126	30%	0.248	0.113	45%	0.144	0.105	73%			
31	0.404	0.273	67%				0.873	2.758	32%				0.104	0.074	71%			
			45%			42%			43%			49%			58%			70%

Recomendaciones sobre las eficiencias a considerar en el cálculo de la función de la velocidad de sedimentación empleando floculantes.

Considerando que el 80% de la carga solida anual está entre los meses de enero, febrero, marzo, abril, noviembre y diciembre; para la presente investigación se ha estimado en dosificar con floculante la entrada del desarenador de la siguiente manera:

Eficiencias de floculante – al ingreso del desarenador

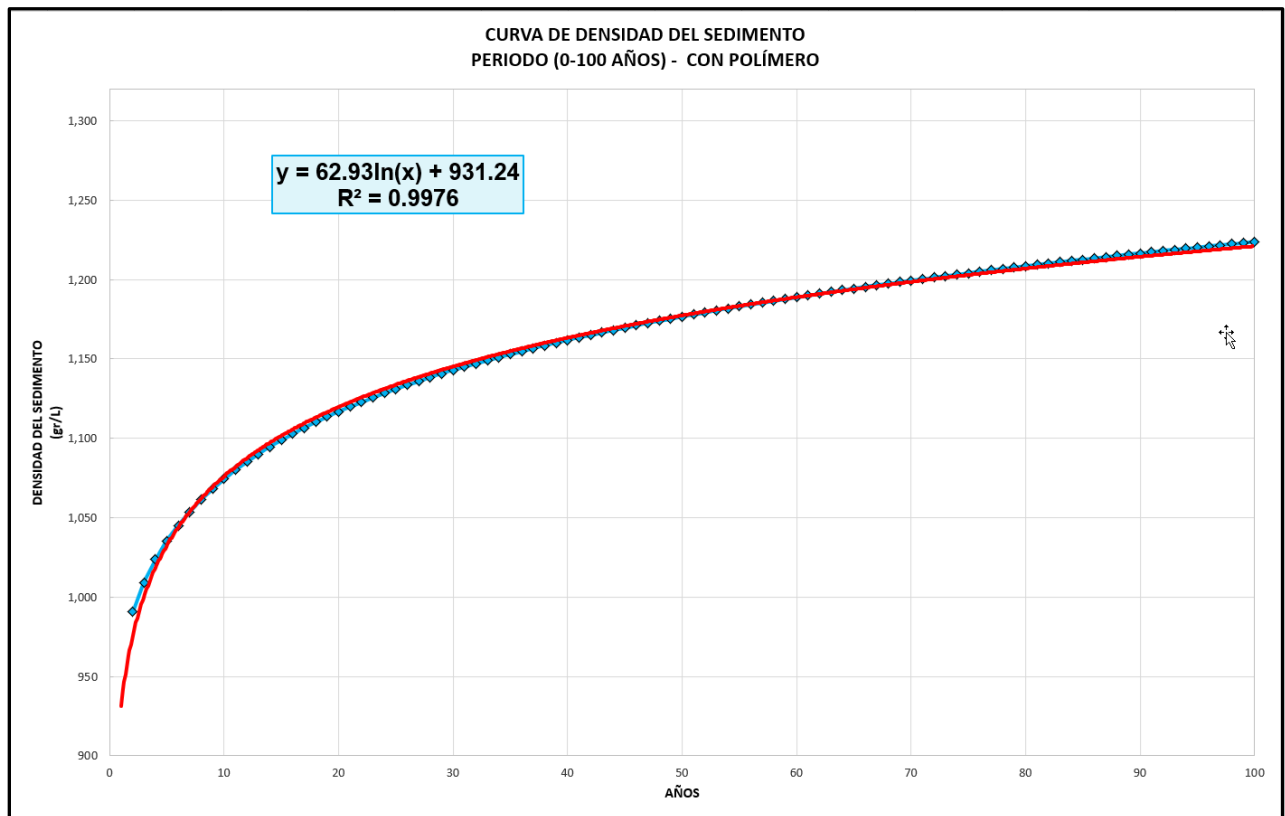
Descripción	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Floculante	X	X	X	X							X	X
Eficiencia promedio del floculante	45%	42%	45%	48%							55%	58%
Sin floculante					X	X	X	X	X	X		

$$\text{Porcentaje (\%)} = \frac{\text{Concentración que sale del desarenador (OUT)}}{\text{Concentración que ingresa al desareandor (IN)}} \times 100$$

El objetivo de determinar estos porcentajes, es establecer con la adición de floculante, en qué porcentaje se reduce la concentración de sedimentos en suspensión (se ha considerado esta manera de calcular porque no existe información de concentración de floculantes, pero sí caudales y concentraciones que ingresa y sale del desarenador); de esta manera, no es necesario conocer la cantidad y concentraciones de floculantes que se ha agregado; esto sería materia de un estudio independiente, y debe realizarse con pruebas de jarras y el factor más importante los caudales que funcionaría el desarenador.

Cálculo de la función de la velocidad de sedimentación empleando floculantes

La metodología es la adoptada por Bureau of Reclamation (Design of Small Dams – Appendix A: Reservoir Sedimentation):



La ecuación para un periodo de 100 años es la siguiente:

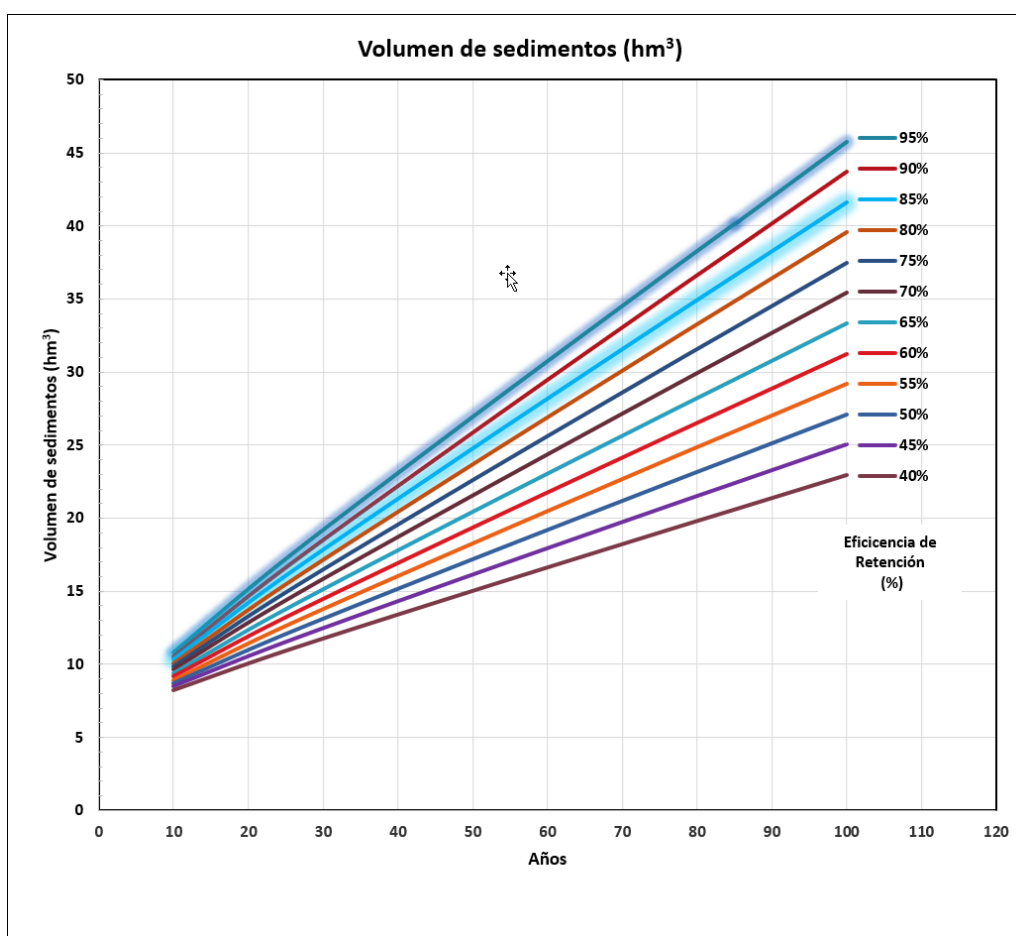
$$y(\text{densidad}) = 62.93 \ln(t) + 931.24 \quad (R^2 = 0.9976)$$

para un tiempo de 100 años se tendrá una densidad de 1,223.77 gr/l.

La metodología adoptada se ha determinado, para diferentes periodos (100, 85, 75, 50, 25 y 10 años) las densidades promedias a diferentes eficiencias de retención:

Determinación del volumen muerto en función al tiempo de operación, densidades del sedimento y eficiencias de retención - floculante

Años	100	85	75	50	25	10
Densidad	1,223.77	1,212.63	1,204.08	1,176.66	1,131.05	1,074.32
Efic. Ret. (%)	Volumen de sedimentos (hm³)					
40	22.98	20.61	19.04	15.04	10.95	8.25
45	25.05	22.39	20.62	16.13	11.51	8.48
50	27.12	24.17	22.20	17.21	12.08	8.71
55	29.19	25.94	23.78	18.29	12.65	8.94
60	31.26	27.72	25.36	19.37	13.22	9.18
65	33.34	29.50	26.94	20.45	13.79	9.41
70	35.41	31.27	28.52	21.53	14.35	9.64
75	37.48	33.05	30.10	22.61	14.92	9.87
80	39.55	34.83	31.68	23.69	15.49	10.10
85	41.62	36.60	33.26	24.77	16.06	10.33
90	43.70	38.38	34.84	25.85	16.63	10.56
95	45.77	40.16	36.42	26.93	17.19	10.80



De la tabla anterior, para una eficiencia de retención del 85%, y un tiempo de 50 años (24.77 hm³), 75 años (33.26 hm³) y 100 años (41.62 hm³).

Años	100	85	75	50	25	10
Densidad	1,223.77	1,212.63	1,204.08	1,176.66	1,131.05	1,074.32
Efic. Ret. (%)	Volumen de sedimentos (hm³)					
	V = 401 hm³					
85%	10.38%	9.13%	8.29%	6.18%	4.00%	2.58%
90%	10.90%	9.57%	8.69%	6.45%	4.15%	2.63%
95%	11.41%	10.01%	9.08%	6.72%	4.29%	2.69%

De la tabla anterior, se puede indicar, para una eficiencia de retención al 85% en los 10 primeros años de funcionamiento se tendrá 2.58% de sedimentos del volumen total de la presa. A los 100 años el 10.38% del volumen total de la presa.

Para una eficiencia de retención al 95%; en los 10 primeros años se tendría un 2.69%, 50 años (6.72%) y 100 años (11.41%)

Esta proyección es válida, siempre y cuando el desarenador tenga buena eficiencia; excelente control en el manejo de los sedimentos; para lo cual, es recomendable automatizar todos los parámetros de control para una mejor gestión de sedimentos en el desarenador y la presa Palo Redondo.