

**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN**

Facultad de Ingeniería

Departamento de Ingeniería

Metalúrgica

**Profesor Patrocinante**

Dr. Eduardo Balladares

**Ingeniero Supervisor**

Frank Zuleta Muñoz

**CONTRIBUCIONES PARA LA ELABORACIÓN DE  
BALANCE METALÚRGICO RECONCILIADO EN PLANTA  
DE PELLETS HUASCO**

**KATHERINE ALEJANDRA LEAL SILVA**

Informe de Memoria de Título  
Para optar al Título de

**Ingeniera Civil Metalúrgica**

Diciembre 2019

## **Agradecimientos**

Quiero dedicarle este logro y triunfo primero que todo a mi familia por haberme apoyado siempre, desde que quise complementar mis estudios en tercero medio para poder entrar a la universidad, hasta cuando decidí cambiarme de carrera a metalurgia, todas esas veces en las que mi hermano Luis Felipe y mi padre José, me iban dejar a la universidad porque iba tarde y por sobre todo a mi gran madre Bernardita, quien ha estado siempre ahí para mí, en cada una de las dificultades que ha significado este camino, desde comidas calentitas hasta ser un paño de lágrimas. Agradecer también al resto de mi familia quienes ansiaban este momento, al tío Jorge por ayudarme a salir y darle un cupo a otro.

A mi pololo Galo quien ha creído en mí, más que yo misma, quien me ha apoyado incondicionalmente, como un pilar fuerte en mis caídas y momentos difíciles, me ha ayudado a ser mejor persona y profesional, siempre orgulloso de mí. Gracias por estar en mi camino, eres el mejor.

A mis amigas y compañeras de universidad Mariajosé, Adriela y Paulina con las que siempre pudimos salir adelante en cada una de las vigiliadas, puedo decir hoy en día que somos realmente grandes y debemos estar orgullosas.

A la gente de CAP Minería que me abrió sus puertas para desarrollar mi memoria de título, especialmente a Don Sergio Trujillo por su tiempo, esfuerzo y apoyo.

## Resumen

La presente memoria de título consiste en diversos aportes que permitan encauzar el balance másico en Planta de Pellets Huasco hacia un esquema de balance reconciliado, específicamente para un esquema de ajuste de balance por método de multiplicadores de Lagrange.

Para contribuir en este esquema se modificaron y crearon protocolos de contrastación para validación y asignación del orden de confianza en instrumentación y su factor de peso,  $W$ , se generaron modelos y planillas de cálculo de acumulación de material en silos y agitadores, se estudió el modelo de acumulación de inventario en espesadores y finalmente se analizó la sensibilidad de la medición del densímetro de colas al cambiar la densidad de sólido.

Las pruebas de contrastación arrojaron que el instrumento menos confiable es el densímetro de colas, con un valor de  $P=0.00$ , por lo que se le asignó, el lugar número uno, en orden de falta de confianza con un factor de peso  $W=0.5$ , seguido del pesómetro de preconcentrado con un valor de  $P=0.04$  y  $W=0.53$  en el lugar número dos.

En el tercer lugar se ubicó el pesómetro de alimentación a molino 3, con un valor de  $P=0.11$  y factor de peso correspondiente a  $W=0.57$ , seguido de este en cuarto lugar se ubicó al pesómetro de pellet producto, con un  $P=0.32$  y  $W=0.71$ .

En quinto lugar el pesómetro de alimentación a molino 4 con  $P=0.41$  y cuyo factor de peso fue de  $W=0.76$  y en último lugar de desviación o en el primer lugar de confianza de los instrumentos contrastados se situó el flujómetro de descarga de relave con  $P=0.767$  y factor de peso  $W=1$ .

Las planillas de cálculo de acumulación de masa en silos y agitadores permiten la obtención de masa por minuto y por día, el cálculo de masa por periodos menores a un día es realizado a través de un método integral, el cual para el caso de acumulación en silos, tiene una variación entre 0.48% y 11%, respecto al método de cálculo diario, a través de un delta de altura final e inicial, por lo que para cálculos de acumulación de masa menores a un día se debe tener en cuenta esta diferencia.

En cuestión de acumulación de masa en agitadores la diferencia que se debe considerar para el caso de cálculos de masa menores a un día, varía entre 4% y 8.20%. Al valor de estas masas en silos y agitadores se les asigna un factor de peso  $W=0.5$ . Para el caso de inventario en espesadores no se puede conocer la masa acumulada en estos sin antes conocer el perfil de concentración al interior.

En el análisis de sensibilización del densímetro de colas se encontró que al aumentar la densidad de sólido de la pulpa de relave disminuye el porcentaje de sólido de la misma. Por otro lado, la diferencia entre el porcentaje de sólido de cada una de las pruebas con respecto al porcentaje de sólido a la densidad de sólido del día, es estadísticamente significativa y, además, la densidad de sólido de cada una de las prueba debería ser mayor a 3.1 [ton/m<sup>3</sup>], esto es mayor a la densidad de sólido usada en la actual calibración del densímetro.



## Abstract

This thesis consists of several contributions that will allow perform the mass balance in Planta de Pellets Huasco towards a reconciled balance scheme. Particularly for a balance adjustment scheme by Lagrange multiplier method.

In order to achieve this objective contrast protocols were modified and created for validation and assignment of the order of confidence in instrumentation and its weight factor,  $W$ , models and spreadsheets of material accumulation were generated in bins and pulp mixers. The inventory accumulation model in thickeners was studied and finally the sensitivity of the measurement of the tail density meter was analyzed changing the density of solid.

The contrast tests showed that the instrument that is least confidence is the tailings densimeter, with a  $P=0.00$ , for which it was assigned the number one place in order to distrust with a weight factor of  $W=0.5$ , followed of the pre-concentrated weightometer with a  $P=0.04$  and  $W=0.53$  in second place,

In the third place was the mill feed weightometer 3, with a  $P=0.11$  and weight factor corresponding to  $W=0.57$ , fourth place was to the product pellet weightometer with  $P=0.32$  and  $W=0.71$ .

Fifth place was the mill feed weightometer 4 with a  $P=0.41$  and whose weight factor was  $W=0.76$  and last deviation or the tailings discharge flowmeter with a  $P=0.767$  and weight factor  $W=1$  was placed in the first place of confidence of the contrasted instruments.

The mass accumulation spreadsheets in silos and mixers allow obtaining mass per minute and per day, mass calculation for periods less than one day is obtained through an integral method, which in the case of accumulation in silos has a variation between 0.48 % and 11 % respect to the method of daily calculation through a delta of final and initial height. Thus, for mass accumulation calculations less than one day should be taken into account this difference.

In terms of mass accumulation in stirrers this difference in the case of mass calculations less than one day varies between 4 % and 8.20 %. A weight factor  $W=0.5$  is assigned to the value of these masses. In the case of inventory in thickeners, the mass accumulated in them cannot be known without first knowing the concentration profile inside.

In the sensitivity analysis of the tail density meter found that increasing the solid density of the tailings pulp decreases the percentage of solid. On the other hand, the difference between the percentage of solid of each of the tests with respect to the percentage of solid to the density of solid of the day is statistically significant and also the density of solid of each of the tests should be

greater than 3.1 [ton/m<sup>3</sup>], this is higher than the solid density used in the current calibration of the densimeter.



## Índice

1. Introducción.....	1
1.1 Objetivo General.....	1
1.2 Objetivos Específicos.....	1
2. Antecedentes .....	3
2.1 Antecedentes de la Empresa .....	3
2.1.1. Alimentación y productos de Planta Pellets.....	4
2.1.2 Descripción general de la producción de pellets.....	6
2.1.3 Descripción del proceso de Molienda – Concentración .....	10
2.2 Antecedentes del balance másico.....	14
2.3 Antecedentes Teóricos .....	16
2.3.1. Instrumentos de medición.....	16
2.3.2. Método de ajuste metalúrgico por multiplicadores de Lagrange .....	16
2.3.3. Protocolos de contrastación .....	17
2.3.4. Pruebas de hipótesis .....	21
2.3.5. Condiciones de muestreo de flujos.....	26
2.3.6. Estados de procedimientos de contrastación en Planta de Pellets .....	28
2.4. Antecedentes de equipos acumuladores.....	30
2.4.1 Silos .....	30
2.4.2. Agitadores .....	30
2.4.3. Espesadores .....	30
2.4.4. Estado del arte de cálculos de masa acumulada .....	30
2.5. Antecedentes de calibración del densímetro de colas.....	31
3. Metodología .....	32
3.1 Metodología de contrastación de instrumentos .....	32
3.1.1 Flujómetro de colas .....	32
3.1.2. Densímetro.....	41
3.1.3. Pesómetro.....	45
3.2. Acumuladores.....	55
3.2.1. Silos .....	55
3.2.2. Agitadores .....	67
3.2.3. Espesadores .....	70
3.3. Sensibilización del densímetro por densidad de sólido .....	72
4. Resultados y Discusiones .....	73
4.1. Resultados Contrastación .....	73
4.1.1. Resultados Flujómetro de Colas.....	73
4.1.2. Resultados Densímetro de Colas .....	77

4.1.3. Resultados Pesómetros.....	82
4.1.4. Resumen resultado instrumentación para prueba de hipótesis t de comparación de medias y orden de confianza asignado .....	92
4.1.5. Resumen resultado instrumentación para prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney .....	95
4.2. Resultados Cálculos de Acumulación .....	97
4.2.1. Resultados acumulación de masa en Silo .....	97
4.2.2. Resultados acumulación Agitadores.....	102
4.3. Resultados análisis sensibilización densímetro.....	105
4.3.1. Prueba de análisis de sensibilización del densímetro para el 7 de Septiembre .....	105
4.3.2. Análisis de sensibilización de densímetro para el 14 de Septiembre .....	107
4.3.3. Prueba de análisis de sensibilización del densímetro para el 21 de Septiembre .....	108
4.3.4. Análisis de sensibilización de densímetro para el 28 de Septiembre .....	110
5. Conclusiones.....	112
5.1. Conclusiones contrastación de instrumentos .....	112
5.1.1. Flujómetro .....	112
5.1.2. Densímetros .....	112
5.1.3. Pesómetros .....	112
5.2. Conclusiones cálculo de acumulación.....	114
5.2.1. Silos .....	114
5.2.3. Agitadores .....	115
5.2.4. Espesador .....	115
5.3. Análisis de sensibilización de densímetro de colas .....	115
6. Recomendaciones.....	117
6.1 Recomendación en pruebas de contrastación .....	117
6.2. Recomendaciones cálculos de Acumulación .....	119
6.3. Recomendaciones análisis de sensibilización de densímetro de colas .....	119
6.4 Recomendaciones generales para balance masa reconciliado .....	119
7. Bibliografía .....	121
ANEXOS A: Anexos de Antecedentes.....	123
Método de ajuste metalúrgico por multiplicadores de Lagrange.....	123
Anexos instrumentos de medición .....	124
ANEXOS B: Anexos de Metodología.....	125
Tabla para contrastación de densímetro .....	127
Tablas para prueba de contrastación de pesómetro .....	128
ANEXO C: Anexos de Resultados.....	130
Distribuciones, límites del noventa por ciento de los datos más probables y prueba de hipótesis t .....	130



Flujómetro de colas .....	130
Densímetro de colas.....	134
Distribuciones, límites del 90% de los datos más probables, dependencia y prueba de hipótesis en análisis del densímetro de colas para 17 de Agosto .....	134
Distribuciones, límites del 90% de los datos más probables, dependencia y prueba de hipótesis en análisis del densímetro de colas para el 24 de Agosto .....	137
Distribuciones, límites dentro del noventa por ciento más probable, dependencia y resultados prueba de hipótesis 7 de Septiembre .....	141
Distribuciones, límites, dependencias y prueba de comparación de medias para análisis densímetro de colas 14 de Septiembre .....	144
Distribuciones, límites dentro del noventa por ciento más confiable y dependencia para el análisis de densímetro el 21 de Septiembre .....	148
Distribuciones, límites dentro del noventa por ciento más probables y dependencia en el análisis de la prueba de densímetro del 28 de Septiembre .....	152
Pesómetros .....	156
Distribuciones, límites del 90% de los datos más probables y prueba de hipótesis t para Molino 4.....	156
Distribución, límites para el 90% de los datos más probables y prueba de hipótesis t para la prueba en pesómetro Molino 3.....	169
Resultado de la prueba t de hipótesis en la contrastación del pesómetro de Preconcentrado alimentación a Silos .....	173
Distribución, límites para 90% de los datos más probables y prueba de hipótesis t para la prueba en pesómetro de pellet producto .....	177
Cálculo de acumulación de masa en Silos .....	181
Pruebas sensibilización densímetro .....	183
Subrutinas acumulación masa silos y agitadores .....	187
Sub rutina Masa acumulada en silos en planilla “Cálculo acc silos diaria y minutos” .....	187
Sub rutina masa acumula en Agitadores.....	198

## Índice de Tablas

Tabla 1: Diferencia en concentrado y recuperación en peso, al comparar el método de cálculo actual y el método de cálculo con colas para Julio 2018 .....	15
Tabla 2: División de niveles dentro del silo.....	55
Tabla 3: Valor de densidad para llenado en un mismo nivel de silo.....	56
Tabla 4: Niveles y sus valores de densidad para el caso de llenado de silo por más de un nivel. .	59
Tabla 5: Niveles y densidades para el caso de llenado de silo desde segundo a tercer nivel .....	60
Tabla 6: Niveles y sus densidades para el caso de llenado de silo desde el primer nivel al segundo nivel.....	61
Tabla 7: Datos de estanque y sensor de nivel utilizados en la contrastación de flujómetro de colas .....	73
Tabla 8: Resumen resultados contrastación flujómetro de relaves FIT 798.....	74
Tabla 9: Resultados contrastación densímetro 17 de Agosto .....	77
Tabla 10: Resultados contrastación densímetro 24 de Agosto .....	78
Tabla 11: Resultados contrastación densímetro 7 de Septiembre .....	79
Tabla 12: Resultados contrastación densímetro para prueba 14 de Septiembre .....	80
Tabla 13: Resultados contrastación densímetro 21 de Septiembre .....	81
Tabla 14: Resultados contrastación densímetro 28 de Septiembre .....	81
Tabla 15: Resumen de resultados de prueba de hipótesis en contrastación de densímetro, diferencia de porcentaje de sólido y porcentaje que esta diferencia representa respecto Mademet. ....	82
Tabla 16: Resumen de resultados prueba de hipótesis en contrastación de densímetros, diferencia y porcentaje de esta diferencia en datos de Mademet y densímetro .....	82
Tabla 17 : Resumen de análisis en pesómetro a Molino 4.....	87
Tabla 18: Tabla resumen de análisis de contrastación en pesómetro de alimentación a Molino 3.	88
Tabla 19: Tabla resumen contrastación de pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos	90
Tabla 20: Tabla resumen análisis de contrastación en pesómetro de pellet producto .....	92
Tabla 21: Resumen de resultados promedios en pruebas de hipótesis de instrumentos contrastados y orden de confianza .....	93
Tabla 22: Factores de peso de extremos .....	94
Tabla 23: Factores de peso para esquema de ajuste de balance por reconciliación de datos. ....	95
Tabla 24: Resultados de orden de confianza según pruebas No Paramétricas .....	96
Tabla 25: Cálculo de acumulación en silo en el caso de llenado con alturas iniciales y finales en el primer nivel.....	98
Tabla 26: Cálculo de acumulación en silo para caso de llenado , con ambas alturas en el segundo nivel.....	99
Tabla 27: Resultado de cálculo de masa descargada con ambas alturas finales e iniciales en el segundo nivel .....	99
Tabla 28: Resultado de masa descargada en silo con ambas alturas en el tercer nivel.....	99
Tabla 29: Resultado de cálculo de acumulación de masa en silo para nivel inicial en primer nivel y altura final en el segundo nivel .....	100
Tabla 30: Resultado acumulación caso de llenado desde segundo al tercer nivel de silo.....	100
Tabla 31 : Descarga de masa desde el tercer al primer nivel de silo .....	101
Tabla 32: Resultado en planilla "Cálculo acumulación agitadores" para el caso de llenado a ritmo aproximadamente constante. ....	103
Tabla 33: Resultado en planilla "Cálculo acumulación agitadores" para el caso de una descarga a ritmo constante.....	103
Tabla 34: Resultado de prueba en planilla "Cálculo de acumulación en agitadores" para el caso de un llenado con fluctuaciones aleatorias .....	104

Tabla 35: Resultado de prueba en planilla “Cálculo de acumulación en agitadores” para el caso de descarga de agitador con fluctuaciones aleatorias .....	104
Tabla 36: Tabla de comparación de medias de porcentaje de sólido a diferentes densidades de sólido con respecto a la media de laboratorio para prueba 7 de Septiembre.....	106
Tabla 37: Resultados de comparación de medias de porcentaje de sólido a diferentes densidades de sólido con respecto a la media de laboratorio para prueba 14 de Septiembre .....	108
Tabla 38: Comparación de medias de porcentaje de sólido a diferentes densidades de sólido con respecto a la media de laboratorio para prueba 21 de Septiembre.....	109
Tabla 39: Comparación de medias de porcentaje de sólido a diferentes densidades de sólido con respecto a la media de laboratorio para prueba 28 de Septiembre.....	111
Tabla 40: Tabla para el registro de actividad de corte de muestras en Dropbox A .....	127
Tabla 41: Registro para medición de porcentaje de sólido laboratorio.....	127
Tabla 42: Registro en caso de derrame.....	128
Tabla 43: Tabla para determinación de velocidad de la correa de forma manual .....	128
Tabla 44: Registro de horas en prueba contrastación pesómetro .....	128
Tabla 45: Flujo másico puntual de cada corte al pasar el testigo por pesómetro .....	129
Tabla 46: Tabla para registro de masado de material correspondiente a un primer corte.....	129
Tabla 47: Resumen prueba Mann-Whitney en densímetro .....	155
Tabla 48: Resumen de la diferencia en molino 4 y valores de P para prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney.....	168
Tabla 49: Resultado cálculo de acumulación masa silos para el caso de alturas finales e iniciales en el tercer nivel.....	181
Tabla 50. Resultado prueba planilla “Cálculo de acumulación masa silo” para el caso de descarga de silo desde el primer nivel y hasta el primer nivel.....	182
Tabla 51: Resultado de cálculo de masa descargada para el caso de altura inicial en el segundo nivel y altura final en el primer nivel.....	182
Tabla 52: Resultado de masa descargada en silo desde altura inicial en tercer nivel a altura final en segundo nivel .....	182
Tabla 53: Resultado de masa acumulada en silo desde altura inicial en primer nivel a altura final tercer nivel.....	183
Tabla 54: Tabla de intervalos de confianza para la media del porcentaje de sólido analizado en Mademet para el día 7 de Septiembre.....	184
Tabla 55: Tabla de intervalos de confianza para la media del porcentaje de sólido analizado en mademet para el día 14 de Septiembre.....	184
Tabla 56: Tabla de intervalos de confianza para la media del porcentaje de sólido analizado en mademet para el día 21 de Septiembre.....	185
Tabla 57: Tabla de intervalos de confianza para la media del porcentaje de sólido analizado en mademet para el día 28 de Septiembre.....	186

## Índice de Figuras

Figura 1: Ubicación Planta de Pellets Huasco.....	4
Figura 2: Pellets básico o autofundente .....	5
Figura 3: Pellets para reducción directa .....	5
Figura 4: Pellets chips .....	5
Figura 5: Pellets feed .....	5
Figura 6: Sinter Feed.....	6
Figura 7: Esquema general de producción de pellets.....	7
Figura 8: Proceso general Planta de Pellets. ....	9
Figura 9: Flowsheet Proceso Molienda Concentración Planta de Pellets Huasco. ....	13
Figura 10: Esquema ejemplo de desviación de un instrumento respecto al valor real. ....	18
Figura 11: Media, mediana y moda para distribuciones simétrica .....	19
Figura 12: Media, mediana y moda para una distribución asimétrica con cola a la derecha	19
Figura 13: Media, mediana y moda para una distribución sesgada a la izquierda . ....	19
Figura 14: Porcentaje de disminución del coeficiente de variación de la media al aumentar el número de muestras. ....	21
Figura 15: Corte transversal correcto .....	27
Figura 16: Vista superior corte transversal correcto .....	27
Figura 17: Posición incorrecta de cortador .....	28
Figura 18: Vista superior corte incompleto .....	28
Figura 19: Cortador vertical de inclinación incorrecta .....	28
Figura 20: Cortador vertical de inclinación correcta .....	28
Figura 21: Comparación de flujos entre flujo en estanque y flujo en flujómetro. ....	34
Figura 22: Gráficas de aumento de volumen en el tiempo, considerando todos los datos de altura del sensor LIT_01A.....	35
Figura 23: Gráficas de aumento de volumen en el tiempo para flujómetro y sensor .....	36
Figura 24: Gráficas de probabilidad de distribución para el volumen calculado en el estanque a partir del sensor de altura en prueba de contrastación flujómetro.....	37
Figura 25: Gráfica de la distribución que mejor se ajusta a los datos de volumen calculados a partir del sensor de altura y límites del noventa por ciento de los datos dentro de esta distribución. ....	37
Figura 26: Gráfica de probabilidad de distribución para el volumen adquirido desde los datos de flujo extraídos del flujómetro FIT 798.....	38
Figura 27: Gráfica distribución con mejor ajuste a los datos de volumen obtenidos a partir de los datos extraídos por el flujómetro FIT798. ....	38
Figura 28: Gráficas de aumento de volumen para flujómetro y sensor una vez aplicado el filtro del noventa por ciento de los datos.....	39
Figura 29: Estanque TK-17 .....	40
Figura 30: Ascenso de personal al estanque TK17 .....	40
Figura 31: Medición de dimensiones en parte superior del estanque .....	41
Figura 32: Comparación entre las distribuciones de porcentaje de sólidos arrojadas por el densímetro y por el laboratorio .....	43
Figura 33: Lugar de corte de muestra. Dropbox A.....	44
Figura 34: Masado y rotulado de recipientes .....	44
Figura 35: Instrumento cortador de muestras colas.....	44
Figura 36: Lavado de cortador de muestras para densímetro.....	44
Figura 37: Nueve tachos dispuestos para ser llenados, en el lugar de muestreo .....	45
Figura 38: Llenado de baldes con pulpa cortada .....	45
Figura 39: Tabla de registro hora de inicio, finalización, masas recipientes y derrames .....	45
Figura 40: Ubicación pesómetros Pellet básico, Preconcentrado y Pellet feed.....	48

Figura 41: [a] Comportamiento del flujo másico en pesómetro de alimentación a molino 4, desde el comienzo de la prueba 10:00 am hasta 11:30, luego de la detención de correa. Para el día 28 de Noviembre. [b] Flujo másico en el periodo de comportamiento más estable, desde las 10:41:52 hasta las 11:00 hrs. ....	49
Figura 42: Gráficas de probabilidad de distribución en minitab para los datos de comportamiento más estable dentro de la prueba de contrastación de pesómetro .....	50
Figura 43: Gráfica de la distribución con mejor ajuste para los datos seleccionados del pesómetro y los límites entre los cuales se encuentran el 5% y el 95% de los datos. ....	50
Figura 44: Diez bolsas numeradas para cada corte de metro. ....	53
Figura 45: Instrumentos para corte de metro. ....	53
Figura 46: Medición de una longitud determinada en la correa para el cálculo de velocidad. ....	53
Figura 47: Marca de sitio de inicio de tiempo en cálculo de velocidad. ....	53
Figura 48: Uso candados de bloqueo. ....	54
Figura 49: Introducción de instrumento de corte de metro. ....	54
Figura 50: Separación de material de corte de metro. ....	54
Figura 51: Traspaso de material de correa a bolsas. ....	54
Figura 52: Tres cortes de metro simultáneamente en una correa. ....	54
Figura 53: Niveles para silo .....	56
Figura 54: Esquema de llenado en primer nivel de silo. ....	58
Figura 55: Script e indicación de ingreso de datos de conversión y densidades para cálculo de acumulación de masa en silos. ....	65
Figura 56: Botón para el cálculo de acumulación de masa en silos y diagrama para la indicación del caso. ....	66
Figura 57: Columna de resultado de acumulación total día e instantánea. ....	67
Figura 58: Indicación de columnas para ingreso de datos de equivalencia de porcentaje de llenado a metros, dimensiones del agitador, densidades y fracción de sólidos de la pulpa. ....	69
Figura 59: Indicación de columna para el ingreso de datos de nivel extraídos desde el sensor de altura del agitador. ....	69
Figura 60: Indicación de la ubicación de columna de resultados de masa acumulada en agitador diaria e instantánea. ....	70
Figura 61: Diagrama funcionamiento Column Test. ....	71
Figura 62: Ejemplo funcionamiento Column Test en planta. ....	71
Figura 63: Pantalla de resultados de perfil de concentración e inventario Column Test. ....	71
Figura 64: Pantalla de resultados Column Test. ....	72
Figura 65: Ajuste a una recta de los datos de aumento de volumen para los métodos de obtención de caudal a través del sensor de altura y a través del flujómetro. ....	75
Figura 66: Prueba de hipótesis de igualdad de medias para contrastación flujómetro de descarga FIT 798. ....	76
Figura 67: Gráfica de variación de flujo másico en cada corte y comparación con la media de flujo másico obtenido al elegir el noventa por ciento de los datos más probables en el pesómetro para contrastación del 16 de Noviembre. ....	84
Figura 68: Gráfica de variación de flujo másico en cada corte y comparación con la media de flujo másico obtenido al elegir el noventa por ciento de los datos más probables para el día 28 de Noviembre. ....	84
Figura 69: Gráfica de variación de flujo másico en cada corte y comparación con la media de los flujos másicos dentro del noventa por ciento más probable para contratación del 29 de Noviembre. ....	85
Figura 70: Gráfica de variación de flujo másico en cada corte y comparación con la media obtenida al elegir el noventa por ciento de los datos más probables de flujo másico para contrastación de pesómetro de preconcentrado molino 3. ....	88



Figura 71: Gráfica variación de flujo másico en cada corte y comparación con su flujo másico puntual para contrastación de pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos.....	90
Figura 72: Gráfica variación de flujo másico en cada corte de metro y comparación con la media de los flujos que se encuentran dentro del noventa por ciento más probable para contrastación de pesómetro de pellet producto. ....	91
Figura 73: Ecuación para factores de peso de instrumentos contrastados. ....	94
Figura 74: Curvas de distribución de porcentaje de sólido para prueba en Mademet en 7 de Septiembre y densidades de sólido 2.7, 3.0, 3.09, 3.1 y 3.2 [ton/m <sup>3</sup> ]......	106
Figura 75: Curvas de distribución de porcentaje de sólido para prueba en Mademet y densidades de sólido 2.97, 3., 3.0 y 3.2 [ton/m <sup>3</sup> ]. ....	107
Figura 76: Curvas de distribución de porcentaje de sólido para prueba en Mademet en 21 de Septiembre y densidades de sólido 3.0, 3.1, 3.12 y 3.2 [ton/m <sup>3</sup> ]......	109
Figura 77: Curvas de distribución de porcentaje de sólido para prueba en Mademet en 28 de Septiembre y densidades de sólido 3.0, 3.06, 3.1 y 3.2 [ton/m <sup>3</sup> ]......	110
Figura 78: Forma matricial de ajuste metalúrgico por medio de multiplicadores de Lagrange ....	123
Figura 79: Esquema funcionamiento densímetro nuclear, tomada de Mineral Processing Technology [6].....	124
Figura 80: Diagrama de válvulas espesador de colas 3.....	126
Figura 81: Comportamiento de los datos de flujo obtenidos por el sensor en una distribución normal, en prueba de contrastación flujómetro. ....	130
Figura 82: Ajuste de probabilidad de distribución para los datos extraídos del flujómetro.....	131
Figura 83: Ajuste a distribución normal de los datos del flujómetro y rango 90% más probable ..	131
Figura 84: Nube de puntos para relación entre el flujo obtenido por sensor y el flujo .....	132
Figura 85: Resultado prueba de hipótesis t de comparación de dos medias independientes .....	132
Figura 86: Resultado de contrastación del flujómetro en prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney .....	133
Figura 87: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido del historial del densímetro en prueba del 17 de Agosto. ....	134
Figura 88: Comportamiento de los datos del densímetro frente a distribución normal. ....	134
Figura 89: Ajuste de probabilidad para los datos cortados y analizados en laboratorio en prueba 17 de Agosto. ....	135
Figura 90: Ajuste a distribución normal de los datos de laboratorio en prueba de contrastación de densímetro para el 17 de Agosto.....	135
Figura 91: Nube de puntos para relación entre porcentaje de sólido del densímetro y porcentaje de sólido de laboratorio, indicando la no dependencia. ....	136
Figura 92: Resultados prueba de hipótesis t de comparación de medias para contrastación de densímetro el 17 el Agosto.....	136
Figura 93: Resultado prueba de hipótesis de Mann-Whitney para prueba contrastación de densímetro el 17 de Agosto.....	137
Figura 94: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido del historial de densímetro en prueba del 24 de Agosto.....	137
Figura 95: Ajuste a distribución normal de los datos de laboratorio en prueba de contrastación de densímetro y noventa por ciento más probable para el 24 de Agosto.....	138
Figura 96: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio en prueba del 24 de Agosto.....	138
Figura 97: Ajuste normal de los datos entregados por laboratorio para el día 24 de Agosto 2018. ....	139
Figura 98: Nube de puntos de no dependencia entre datos de porcentaje de sólido de densímetro y prueba en día 24 de Agosto. ....	139

Figura 99: Resultados prueba de hipótesis t de comparación de medias para contrastación de densímetro el 24 el Agosto.....	140
Figura 100: Resultado prueba de hipótesis de Mann-Whitney para prueba contrastación de densímetro el 24 de Agosto.....	140
Figura 101: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido del historian de densímetro en prueba del 7 de Septiembre.....	141
Figura 102: Ajuste a distribución normal de los datos de porcentaje de sólido del densímetro en prueba del 7 de Septiembre.....	141
Figura 103: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio en prueba del 7 de Septiembre.....	142
Figura 104: Ajuste a distribución normal de los datos de laboratorio en prueba de contrastación de densímetro para el 7 de Septiembre.....	142
Figura 105: Gráfica relación entre los porcentajes de sólido del densímetro y datos de laboratorio en prueba de contrastación 7 de septiembre.....	143
Figura 106: Prueba de hipótesis t de dos muestras para contrastación del densímetro el 7 de Septiembre.....	143
Figura 107: Resultados Prueba de Mann-Whitney de comparación de medias para contrastación densímetro el 7 de Septiembre.....	144
Figura 108: Gráfica de probabilidad de ajuste de distribución para los datos de porcentaje de sólido del densímetro para prueba del 14 de Septiembre.....	144
Figura 109: Ajuste de probabilidad Normal para los datos del densímetro en prueba del 14 de Septiembre.....	145
Figura 110: Gráfica de probabilidad de ajuste de distribución para los datos de porcentajes de sólidos cortados y analizados en laboratorio para prueba del 14 de Septiembre.....	145
Figura 111: Gráfica de comportamiento de datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio dentro de una distribución normal para el 14 de Septiembre.....	146
Figura 112: Gráfica de análisis de dependencia entre porcentaje de sólido de densímetro y porcentajes de sólidos entregados por laboratorio para prueba de 14 de Septiembre.....	146
Figura 113: Resultados prueba de hipótesis t de comparación de medias para contrastación de densímetro el 14 de Septiembre.....	147
Figura 114: Resultado prueba de hipótesis de Mann-Whitney para prueba contrastación de densímetro el 14 de Septiembre.....	147
Figura 115: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido del historian de densímetro en prueba del 21 de Septiembre.....	148
Figura 116: Ajuste de probabilidad Normal para los datos del densímetro en prueba del 21 de Septiembre.....	148
Figura 117: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio en prueba del 21 de Septiembre.....	149
Figura 118: Ajuste de probabilidad Normal para los datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio en prueba del 21 de Septiembre.....	149
Figura 119: Gráfica de análisis de dependencia entre los datos de porcentaje de sólido de densímetro y laboratorio en prueba del 21 de Septiembre.....	150
Figura 120: Resultados prueba de hipótesis t de comparación de medias para contrastación de densímetro el 21 de Septiembre.....	150
Figura 121: Resultado prueba de hipótesis de Mann-Whitney para prueba contrastación de densímetro el 21 de Septiembre.....	151
Figura 122: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido del historian de densímetro en prueba del 28 de Septiembre.....	152
Figura 123: Ajuste de probabilidad Normal para los datos del densímetro en prueba del 28 de Septiembre.....	152

Figura 124: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio en prueba del 28 de Septiembre.....	153
Figura 125: Ajuste de probabilidad Normal para los datos de porcentaje de sólido entregados por el densímetro en prueba del 14 de Septiembre.....	153
Figura 126: Gráfica de análisis de dependencia entre los datos de porcentaje de sólido de densímetro y laboratorio en prueba del 28 de Septiembre. ....	154
Figura 127: Resultados prueba de hipótesis t de comparación de medias para contrastación de densímetro el 28 de Septiembre.....	154
Figura 128: Resultado prueba de hipótesis de Mann-Whitney para prueba contrastación de densímetro el 28 de Septiembre.....	155
Figura 129: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico de comportamiento más estable y cercano a los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 4, para el día 16 de Noviembre. ....	156
Figura 130: Gráfica de la distribución con mejor ajuste y límites de flujo másico para el noventa por ciento de los datos más probables del pesómetro de alimentación a molino 4, durante la prueba de contrastación del 16 de Noviembre .....	157
Figura 131: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 4, para el día 16 de Noviembre. ....	157
Figura 132: Gráfica de probabilidad de distribución weibull para los datos de flujos másicos provenientes de los cortes de la prueba del 16 de Noviembre en pesómetro molino 4.....	158
Figura 133: Gráfica de probabilidad de distribución normal para los datos de flujos másicos provenientes de los cortes de la prueba del 16 de Noviembre en pesómetro molino 4.....	158
Figura 134: Gráfica de análisis de dependencia entre flujos másicos pesómetro molino 4 y flujos másicos obtenidos a través de cortes de metro en la prueba de contrastación del 16 de Noviembre. ....	159
Figura 135: Resultado prueba t de hipótesis en minitab para la contrastación del 16 de Noviembre en Molino 4.....	159
Figura 136: Resultado de la prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney para contrastación pesómetro molino 4, el 16 de Noviembre. ....	160
Figura 137: Gráficas de probabilidad de distribución en minitab para los datos de comportamiento más estable dentro de la prueba de contrastación en pesómetro molino 4, para el día 28 de Noviembre.....	160
Figura 138: Gráfica de la distribución con mejor ajuste para flujos másicos en la prueba de contrastación del 28 de Noviembre en pesómetro alimentación molino 4 y límites para el noventa por ciento de datos más probables.....	161
Figura 139: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 4, para el día 28 de Noviembre. ....	161
Figura 140: Gráfica de probabilidad de distribución normal para los datos de flujos másicos provenientes de los cortes de la prueba del 28 de Noviembre en pesómetro molino 4.....	162
Figura 141: Gráfica de análisis de dependencia entre flujos másicos pesómetro molino 4 y flujos másicos obtenidos a través de cortes de metro en la prueba de contrastación del 28 de Noviembre. ....	162
Figura 142: Resultado prueba t de hipótesis en minitab para la contrastación de pesómetro de alimentación a molino el día 28 de Noviembre. ....	163
Figura 143: Resultado de la prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney para contrastación pesómetro molino 4, el 28 de Noviembre. ....	163



Figura 144: Gráficas de probabilidad de distribución en minitab para los datos de comportamiento más estable dentro de la prueba de contrastación en pesómetro de alimentación a molino 4, el día 29 de Noviembre. ....	164
Figura 145: Gráfica de la distribución con mejor ajuste para los flujos máxicos dentro de comportamiento más estables en la prueba de contrastación del 29 de Noviembre en pesómetro de alimentación molino 4 y límites de flujos máxicos para el noventa por ciento de los dato más probable. ....	165
Figura 146: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo máxico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 4, para el día 29 de Noviembre. ....	165
Figura 147: Ajuste de distribución normal para los datos de flujos máxicos provenientes de los cortes de la prueba del 29 de Noviembre en pesómetro molino 4. ....	166
Figura 148: Gráfica de análisis de dependencia entre flujos máxicos pesómetro molino 4 y flujos máxicos obtenidos a través de cortes de metro en la prueba de contrastación del 29 de Noviembre .....	166
Figura 149: Resultado prueba t de hipótesis para la contrastación de pesómetro alimentación a molino 4 para el día 29 de Noviembre. ....	167
Figura 150: Resultado de la prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney para contrastación pesómetro molino 4, el 29 de Noviembre. ....	168
Figura 151: Gráficas de probabilidad de distribución en minitab para los datos de comportamiento más estable en la prueba de contrastación en pesómetro alimentación molino 3, el día 5 de Diciembre. ....	169
Figura 152: Gráfica de la distribución con mejor ajuste para flujos máxicos en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 3, el 5 de Diciembre y límites de flujo máxico para el noventa por ciento de datos más probables. ....	169
Figura 153: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo máxico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 3, para el día 5 de Diciembre. ....	170
Figura 154: Ajuste de distribución normal para los datos de flujos máxicos provenientes de los cortes de la prueba del 5 de Diciembre en pesómetro Molino 3. ....	170
Figura 155: Gráfica de análisis de dependencia entre flujos máxicos pesómetro Molino 3 y flujos máxicos obtenidos a través de cortes de metro en la prueba de contrastación del 5 de Diciembre. ....	171
Figura 156: Resultado prueba t de hipótesis en minitab para la contrastación de pesómetro de alimentación a molino 3, el día 5 de Diciembre. ....	171
Figura 157: Resultado de la prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney para contrastación pesómetro molino 3, el 5 de Diciembre. ....	172
Figura 158: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo máxico puntuales de la pantalla del pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos en la prueba de contrastación, para el día 10 de Diciembre. ....	173
Figura 159: Ajuste de distribución normal para los datos de flujos máxicos puntuales indicados en pantalla de pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos, en prueba del 10 de Diciembre. ....	173
Figura 160: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo máxico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a silos para el día 10 de Diciembre...	174
Figura 161: Ajuste de distribución normal para los datos de flujos máxicos provenientes de los cortes de la prueba del 10 de Diciembre en pesómetro alimentación a silos. ....	174
Figura 162: Gráfica de dependencia entre los flujos máxicos puntuales del historian del pesómetro de alimentación a silos y los flujos máxicos obtenidos en los cortes de la prueba del 10 de Diciembre. ....	175

Figura 163: Resultado prueba t de hipótesis en minitab para la contrastación de pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos el día 10 de Diciembre. ....	175
Figura 164: Resultado prueba t de hipótesis para muestras pareadas en la prueba de contrastación de pesómetro alimentación a silos el 10 de Diciembre. ....	176
Figura 165: Prueba de hipótesis no paramétrica de Wilcoxon para la contrastación de pesómetro de preconcentrado alimentación a silos para el día 10 de Diciembre .....	176
Figura 166: Resultado prueba de hipótesis no paramétrica de Wilcoxon para la contrastación de pesómetro de preconcentrado alimentación a silos para el día 10 de Diciembre.....	177
Figura 167: Gráficas de probabilidad de distribución en minitab para lo datos de comportamiento más estable en la prueba de contrastación en pesómetro de pellet producto para el día 11 de Diciembre.....	177
Figura 168: Gráfica de la distribución con mejor ajuste para flujos máxicos en la prueba de contrastación en pesómetro de pellet producto el día 11 de Diciembre y límites para el noventa por ciento de los datos más probables. ....	178
Figura 169: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo máxico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de Pellet producto, para el día 11 de Diciembre. ....	178
Figura 170: Gráfica de probabilidad de distribución weibull para los datos de flujos máxicos provenientes de los cortes de la prueba del 11 de Diciembre en pesómetro pellet producto .....	179
Figura 171: Ajuste de distribución normal para los datos de flujos máxicos provenientes de los cortes de la prueba del 11 de Diciembre en pesómetro pellet producto.....	179
Figura 172: Gráfica de análisis de dependencia entre flujos máxicos historian y flujos máxicos obtenidos a través de cortes de metro en la prueba de contrastación de pesómetro pellet producto para el 11 de Diciembre. ....	180
Figura 173: Resultado prueba t de hipótesis de comparación demedias en minitab para la contrastación de pesómetro de pellet producto el día 11 de Diciembre. ....	180
Figura 174: Resultado de la prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney para contrastación pesómetro pellet producto, el 11 de Diciembre.....	181
Figura 175: Resultado prueba de hipótesis de comparación entre el porcentaje de sólido de la muestra llevada a laboratorio y el porcentaje de sólido al usar la densidad de sólido promedio del día para el 7 de Septiembre. ....	183
Figura 176: Resultado prueba de hipótesis de comparación entre el porcentaje de sólido de la muestra y el porcentaje de sólido al usar la densidad de sólido promedio del día para el 14 de Septiembre.....	184
Figura 177: Prueba de hipótesis comparación de porcentaje de solido entre el porcentaje de sólido de la muestra y el porcentaje de solido al usar la densidad de sólido del día para el 21 de Septiembre.....	185
Figura 178: Prueba de hipótesis comparación de porcentaje de sólido entre el porcentaje de sólido de la muestra y el porcentaje de sólido al usar la densidad de sólido del día para el 28 de Septiembre.....	186
Figura 179: Fórmulas para la obtención de los coeficientes Anderson- Darling y sus valores críticos .....	187

## 1. Introducción

En la actualidad el balance de masa en planta de pellet se realiza a través de la recuperación en peso, usando las leyes de alimentación, concentrado y colas. Sin embargo ese método ha traído algunas discrepancias en el cálculo de material, especialmente en el material en cancha que es cubicado originalmente y cuando parte de él es embarcado, lo que queda en canchas, según cubicación, es mayor a lo que el pesómetro de salida indica.

Por otro lado, en el área de producción se necesita conocer si las mejoras implementadas tienen el impacto esperado en la producción.

El actual cálculo de corrientes por medio de la Recuperación es el denominado fórmula de 2-productos, los cuales corresponderían a cola y concentrado, en el que se necesita la ley de un sólo elemento de interés de confianza en las corrientes, producto de los cuales los balances de masa podrían no cumplir con las leyes de conservación de masa. Además, este método no da solución al problema de conocer los flujos internos para evaluar mejoras. Razones por las que la literatura indica que este método de n-producto no puede ser considerado por mucho tiempo más como un método de balance de masa [1].

Lo que hoy en día se recomienda es la realización de balances másicos a través del método de los mínimos cuadrados generalizados o reconciliación de datos por ajuste metalúrgico con multiplicadores de Lagrange [1]. Este método busca la mejor estimación de los valores teóricos de las corrientes usando el criterio de los mínimos cuadrados, valores para los cuales se cumplen las leyes de conservación de masa e incluye factores de peso o niveles de confianza de los datos obtenidos en las corrientes.

Para poder llegar a tener los factores de peso o confianza y cuantificar acumulaciones que afecten las corrientes del sistema de reconciliación de datos es que en la presente memoria se generan diversos aportes o pasos previos que permitirán encauzar el balance másico hacia la reconciliación de datos.

### 1.1 Objetivo General

1. Establecer mejoras de procedimientos y de información relevante para la realización de balance másico reconciliado en Planta de Pellets Huasco.

### 1.2 Objetivos Específicos

1. Investigar el estado de procedimientos de contrastación en Planta de Pellets en instrumentos tales como; Pesómetros de alimentación a silos, pesómetro de alimentación a molinos y pesómetro de pellet producto. Flujómetro y densímetro de descarga de relave.

2. Llevar procedimientos existentes a forma de protocolos de contrastación.
3. Implementar protocolos y generar protocolos de contrastación para validación y asignación del orden de confianza en instrumentos donde no existan procedimientos o protocolos.
4. Generar modelo y planilla de cálculo de acumulación de materia en silos y agitadores.
5. Investigar y estudiar modelo de acumulación de inventario sólido en espesadores.
6. Analizar la sensibilidad de la medición del densímetro al cambiar la densidad de sólido de la pulpa de relave.



## 2. Antecedentes

### 2.1 Antecedentes de la Empresa

Planta de Pellets Huasco pertenece a la operación Valle del Huasco de CAP Minería, la que incluye también el puerto Guacolda II y la mina Los Colorados. Está ubicada en la región de Atacama, Chile, Figura 1, al sur del puerto de Huasco, con el que se une a través de un camino asfaltado de 5 kilómetros y que continúa hasta la ciudad de Vallenar, a 53 kilómetros.

Las minas El Algarrobo y Los Colorados se conectan con Planta de Pellets por las líneas férreas de 86 kilómetros y 109 kilómetros, respectivamente, desde donde se transporta el preconcentrado para iniciar el proceso de elaboración de pellets.

CAP minería pertenece un 75% a CAP S.A, holding dueño también de CAP ACERO y NOVACAP, un 25% pertenece a MC Inversiones Ltda., filial de Mitsubishi en Chile y un porcentaje menor a Carlos Ruiz de Gamboa Gómez y a Jorge Zalaquett Daher.

CAP Minería es el principal productor y exportador de concentrados magnéticos de alta ley y pellets en la costa americana del Pacífico. Sus principales operaciones son Valle de Copiapó, Valle del Huasco y Valle del Elqui, en la región de Atacama y Coquimbo [2].

Planta de Pellets inició operaciones el 28 de Diciembre de 1977, con una capacidad para producción de 3.500.000 toneladas anuales de pellets, según su diseño original.

En 1989, luego de sucesivas modificaciones al proceso, se alcanzó una capacidad de producción de 4.000.000 toneladas anuales de pellets, la cual se distribuye en producción de pellets de reducción directa y pellets básico. Además, se dispuso de una capacidad de producción de 850.000 toneladas anuales de pellets feed.

En 2013 con la puesta en marcha del proyecto APVH (Aumento de producción del Valle del Huasco) que implicó la ampliación de mina Los Colorados y la incorporación de una cuarta línea en Planta de Pellets, se aumentó la capacidad de producción de pellets feed a 3.000.000 de toneladas anuales.

Para el 2017 se logró una producción global de 6 millones 455 mil toneladas métricas distribuido en 3 millones 469 mil toneladas métricas de pellet autofundente, 185 mil toneladas de pellets para reducción directa y 242 mil toneladas métricas de pellets chips. Además de 2 millones 414 mil toneladas métricas de pellet feed y 145 mil toneladas métricas de finos Huasco y adicionalmente se registró una producción de sinter feed de 1 millón 650 mil toneladas métricas [3].



Figura 1: Ubicación Planta de Pellets Huasco. [3].

### 2.1.1. Alimentación y productos de Planta Pellets

La Alimentación a Planta de Pellets puede ser de tres tipos; Básico (58% de Hierro), RD (61% de Hierro) o sinter feed (63% de Hierro).

Los productos generados en Planta de Pellets son pellets básico o autofundente, pellets para reducción directa y pellets chips por parte de la sección de pellets como aglomerado.

El pellet básico corresponde a un aglomerado de concentrado de hierro en forma de nódulos, de tamaño entre 9 a 16 [mm], que contiene un aditivo álcali (como cal, caliza o dolomita), de ley mayor a 65% de Fe y un máximo de un 3.5% de  $\text{SiO}_2$ , el cual es utilizado en carga directa a altos hornos para producir arrabio. Figura 2.

El pellet para reducción directa o pellet RD también es un aglomerado de concentrado de hierro de tamaño entre 9 y 16 [mm] pero que requiere de mayor ley y menores impurezas, es por esto que este pellet tiene una ley mínima de 66.4% de hierro y un máximo de 1.8% de  $\text{SiO}_2$ , es utilizado en la producción de hierro esponja, por el método de reducción directa y a diferencia del pellet básico tiene un color marrón. Figura 3.



El pellets chips se forma a partir de pellets fragmentados durante su proceso de producción, disminuyendo su tamaño a menos de 8 [mm] pero de ley superior a 65% de Fe. Figura 4. Adicionalmente se generan los productos pellets feed y sinter feed. El pellet feed corresponde a concentrado de hierro de bajo tamaño, menor a 44 micrones, de ley mayor a 68 % de Fe y humedad máxima 8.75% que se utiliza como carga para el proceso de aglomeración y formación de pellets. Figura 5.

Sinter feed es mineral de hierro comercializable producido en mina Los Colorados pero recepcionado y embarcado en las canchas de Planta de Pellets, debe cumplir con un máximo de un 5% sobre 6.3 milímetros y máximo 35% bajo 150 micrones de tamaño y tiene una ley mínima de 63% de Fe , 6% de  $\text{SiO}_2$  y 0.15% máximo de P. Este sinter feed debe ser aglomerado para cargar un alto horno. Figura 6 [4].



Figura 2: Pellets básico o autofundente [4].



Figura 3: Pellets para reducción directa [4].



Figura 4: Pellets chips [4].



Figura 5: Pellets feed [4].



*Figura 6: Sinter Feed [4].*

### **2.1.2 Descripción general de la producción de pellets**

La producción de pellets involucra en primer lugar la obtención de un producto intermedio denominado preconcentrado de mineral de hierro, el que luego será transformado en pellets, (esferas de concentrado de hierro con un diámetro entre 9 a 16 [mm] y bajo grado de impurezas).

El preconcentrado utilizado en el proceso proviene del tratamiento de mineral de hierro que se extrae desde la mina los Colorados, el cual es sometido a diversas etapas de chancado y concentración magnética en seco. Este preconcentrado, para el caso de mina los Colorados consistente principalmente en magnetita y puede ser de tres tipos; Básico (58% de Hierro), RD (61% de Hierro) o sinter feed (63% de Hierro).

La producción de pellets involucra en su proceso, principalmente las etapas de Molienda, Concentración, Balling y Endurecimiento Térmico [5]. En la Figura 7: Esquema general de producción de pellets. [5]. se muestra el esquema general de la producción de pellets a partir de la obtención de preconcentrado desde la mina los colorados.



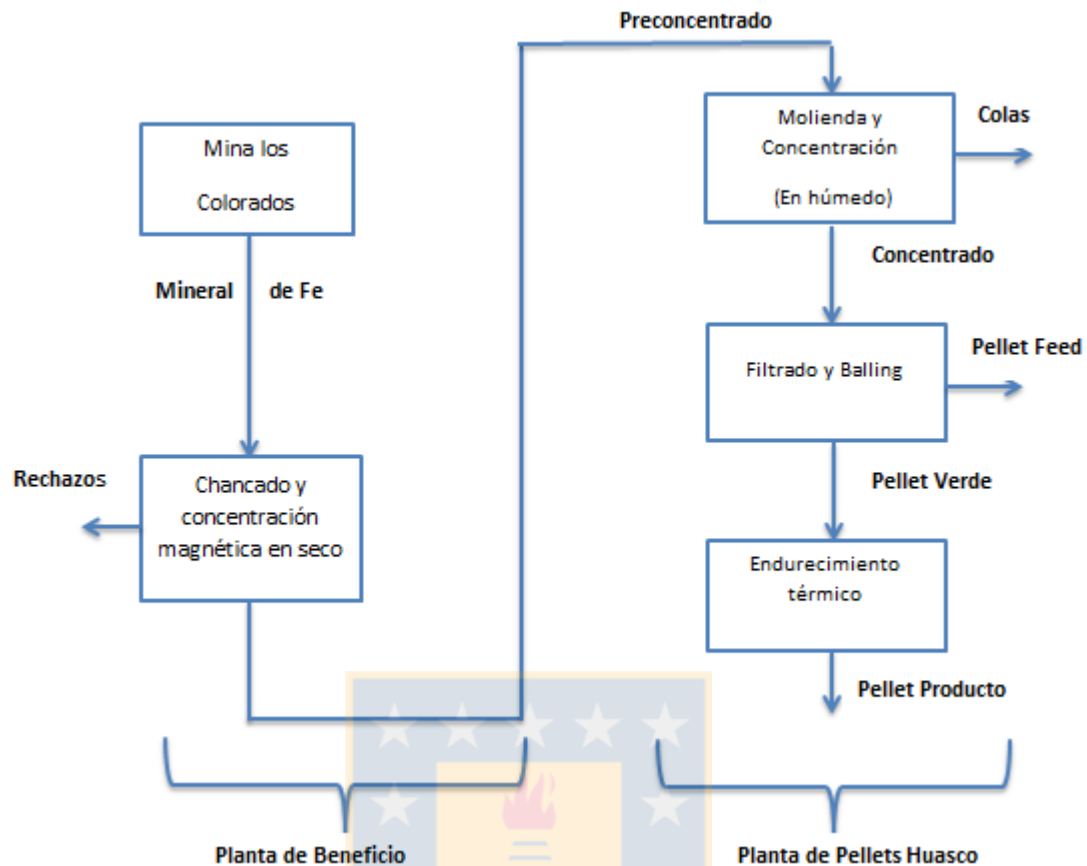


Figura 7: Esquema general de producción de pellets. [5].

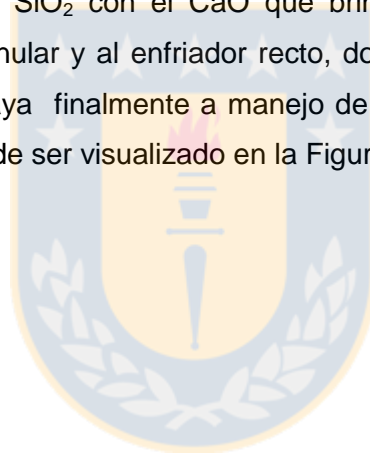
En Planta de Pellets el pre-concentrado pasa primero a un circuito de molienda clasificación donde se logra el material con la granulometría adecuada para formar pellet, a continuación el mineral fino, se concentra primero en un hidroseparador, luego en baterías magnéticas y finalmente en espesadores de concentrado. Este concentrado húmedo debe ser filtrado antes de ser vendido como pellet feed y antes de continuar el proceso para pellet básico. Una vez en Balling el concentrado llega a los buzones de concentrados para pasar a los discos pelletizadores, en este trayecto el concentrado se mezcla además con cal hidratada y caliza de alta pureza, los que actúan como aglomerantes en el proceso de peletización. En los discos pelletizadores se forma la esfera llamada pellet verde, que será clasificada en los harneros de rodillos. Por la primera sección de los harneros caen los finos pellets aproximadamente menores a 9 [mm], por la sección central cae el producto, esferas de 16 [mm] y por la sección final sale el material grueso.

Los pellets verdes clasificados pasarán a la etapa de endurecimiento térmico. El tratamiento térmico de Planta de Pellets Huasco corresponde al sistema “**Grate-Kiln-Cooler**”, el cual consiste en la combinación de “parrilla recta - horno rotatorio - enfriador anular”, con recuperación de calor,

La ventaja de este sistema es que se producen pellets de calidad más uniforme al separar la operación de Endurecimiento Térmico en dos etapas, una parrilla móvil para el secado y precalentamiento de los pellets verdes y un horno rotatorio para lograr uniformidad de quemado.

Este proceso térmico comienza cuando ingresan los pellets verdes al horno de parrilla, que se divide en tres partes principales la UDD (under draught dryng) , DDD (down draught drying) y TPH (tempering pre heating). En la primera parte los gases calientes ingresan por abajo y en la segunda por arriba y va aumentando la temperatura desde 100 [°C] a 340 [°C] y finalmente a 830 [°C]. En este proceso se genera otro producto, los pellets chips, que corresponden a pellets que durante su tránsito por el horno de parrilla se rompen debido al cambio brusco de temperatura, esto porque la humedad dentro del pellet es mayor a la que se especifica para un buen pellet [3].

El paso siguiente es el horno rotatorio donde se someten a temperaturas de hasta 1330 [°C] y existen reacciones de la ganga  $\text{SiO}_2$  con el  $\text{CaO}$  que brindan una mayor dureza al pellet. A continuación pasa al enfriador anular y al enfriador recto, donde se producen las cristalizaciones para que el pellet básico final vaya finalmente a manejo de productos y embarque. El proceso general de Planta de Pellets puede ser visualizado en la Figura 8.



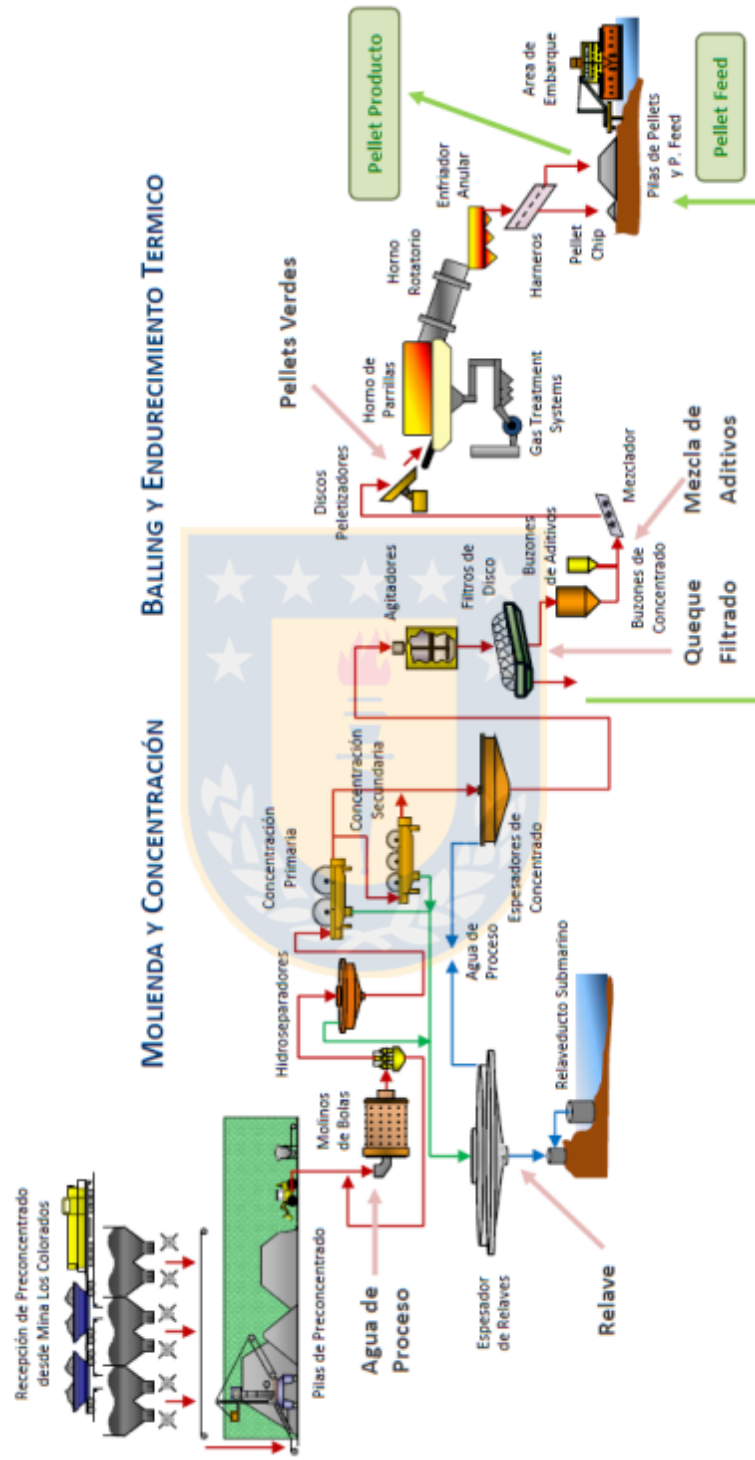


Figura 8: Proceso general Planta de Pellets. [4].

### **2.1.3 Descripción del proceso de Molienda – Concentración**

El proceso parte con la descarga de trenes, 12 trenes máximo por día, esto es, se recibe una alimentación máxima de 25.200 [ton] diarias.

La descarga de los trenes puede ir a las canchas donde se encuentran las pilas de pre-concentrado o a las correas que alimentan a los silos (se debe tener en cuenta que el 55% de la alimentación debe ir a los silos).

Actualmente existen 4 líneas de molienda concentración, las líneas 1,2 y 3 tienen configuración conjunta y corresponden al diseño original de la planta. La línea 4 fue construida en 2013, en el marco del desarrollo del proyecto Aumento de Producción Valle Huasco, APVH para aumentar la capacidad de producción de la planta.

#### **Alimentación Preconcentrado**

Cada línea consta de un silo de almacenamiento, en los que no se puede contar con el total de su capacidad pues con el paso del tiempo se ha ido acumulando carga muerta. Bajo cada silo existen 3 correas transportadoras de descarga de velocidad variable, el silo 1, a diferencia del resto de los silos, solo descarga por la correa central. Las correas bajo silo descargan en la correa que alimenta al molino, esta correa cuenta con un pesómetro.

#### **Molienda clasificación**

Cada línea consta de un circuito directo de molienda clasificación, con molinos de bolas 1, 2, 3 y 4, cuyas dimensiones del 1 al 3 corresponden a  $D \times L = 16 \frac{1}{2}' \times 37 \frac{1}{2}'$  y en el molino 4 corresponden a  $20' \times 38'$ . Al molino entra la alimentación fresca proveniente del silo, el underflow de los hidrociclones y agua de proceso para dilución.

El molino número 1 a diferencia del resto tiene coraza magnética y no cuenta con levantadores o lifters y su alimentación es menor aproximadamente a 212 [ton/h], con respecto a las 240- 270 [ton/hr] con las que en promedio se alimenta a los molinos 2 y 3. (Se tiene un ritmo de alimentación promedio a cada línea de 240- 250 TMPH).

En los molinos se muele a una granulometría de 30-40% -#325 (45 micrones) y la descarga de cada molino es diluida en un sumidero con agua de proceso llegando a un porcentaje de 40% de sólidos. Luego, la pulpa es enviada a una batería de 7 hidrociclones por línea, donde se clasifican los gruesos que descargan por el under del hidrociclón, retornando al molino y por el vórtex o sobreflujo descargan los finos. Es aquí donde el 83% del sobreflujo debe estar bajo la malla 325 para pellet básico y el 77% del sobreflujo (77% -#325) para obtener pellet feed.

## Concentración

El sobreflujo va a un hidroseparador donde se produce una separación entre el material de interés y ganga por diferencia de densidades ya que la magnetita tiene una densidad de  $5.2 \text{ [g/cm}^3\text{]}$  y la sílice, principal ganga, tiene una densidad de  $2.63 \text{ [g/cm}^3\text{]}$ . Este proceso es ayudado por un floculador magnético, un imán que reúne el material con propiedades magnéticas para que pueda decantar.

El rebalse del hidroseparador va a los espesadores de cola y la descarga va a la caja distribuidora a baterías o caja repartidora Figura 9, donde pasa por una primera etapa recuperadora de la concentración magnética, en la cual se utilizan 2 tambores magnéticos de imanes permanentes, de  $D=48$  pulgadas cada uno y de 1000 Gauss. Se puede hacer uso además de una segunda etapa de concentración magnética del tipo selectiva, donde el gausaje es menor, 750 Gauss, y solo responden las partículas con mayores propiedades magnéticas. En este segundo proceso se usan baterías de 3 tambores de  $D=36$  pulgadas.

Las configuraciones generales pueden ser, pasar por las baterías primarias luego irse al distribuidor de baterías secundarias, pasar a las secundarias y luego a repaso o solo pasar por primarias, al igual que solo a secundarias o por primarias y luego repaso, a menudo no se hace uso de las baterías de repaso. Estas configuraciones dependen de la calidad del material, si el material es alto en hierro magnético, entonces se pasa solo por las baterías primarias, cuando se quiere lograr una calidad midrex, es común que se usen hasta las baterías de repaso.

El concentrado de las líneas 1, 2, 3 va al sumidero cuádruple, el cual cuenta con 4 cajas, la 60-1, 60-2, 60-3 y 60-4. La línea 4 tiene sus propios sumideros de baterías primarias y secundarias, estos son los sumidero 11 y 12.

La caja 60-1 puede distribuir a la caja repartidora de espesadores de concentrado, directo al espesador de concentrado 1 o directo al espesador de concentrado 2, la 60-2 puede llegar a la caja repartidora a espesadores, al agitador 1 de pellet básico, y al agitador 2, la 60-3 a la caja repartidora de espesadores y al espesador de concentrado 2, la 60-4 distribuye a la caja repartidora de espesadores, al agitador de pellet básico 1, al agitador de pellet feed. La caja repartidora puede distribuir al espesador de concentrado 1 y 2. La descarga de los espesadores pasa a la caja de recirculación, si esta descarga está con sobre 68% de sólido pasa a los agitadores, si no, se recircula otra vez a los espesadores.

## Filtrado

Desde los agitadores, el concentrado pasa a las cajas repartidoras a filtros, ambas cajas pueden recibir descarga de ambos agitadores para luego alimentar a las bateas de los filtros que generan el concentrado o queque con 8.5% de humedad.

## Colas

Las colas totales están constituidas por el sobreflujo de los hidroseparadores y el rechazo de las baterías magnéticas de cada línea. En general, las colas de las 3 líneas más antiguas se van al espesador de colas 1 con la excepción de la línea 3 que también puede dirigir el sobreflujo de los hidroseparadores y colas de baterías magnéticas hacia el espesador de colas 3 en su totalidad o en parte. Se adiciona un floculante que acelera la sedimentación de los sólidos y permite recuperar agua por el rebalse que se integra nuevamente al proceso.

En la Figura 9 se muestra el proceso de molienda concentración a través de un diagrama de bloques.



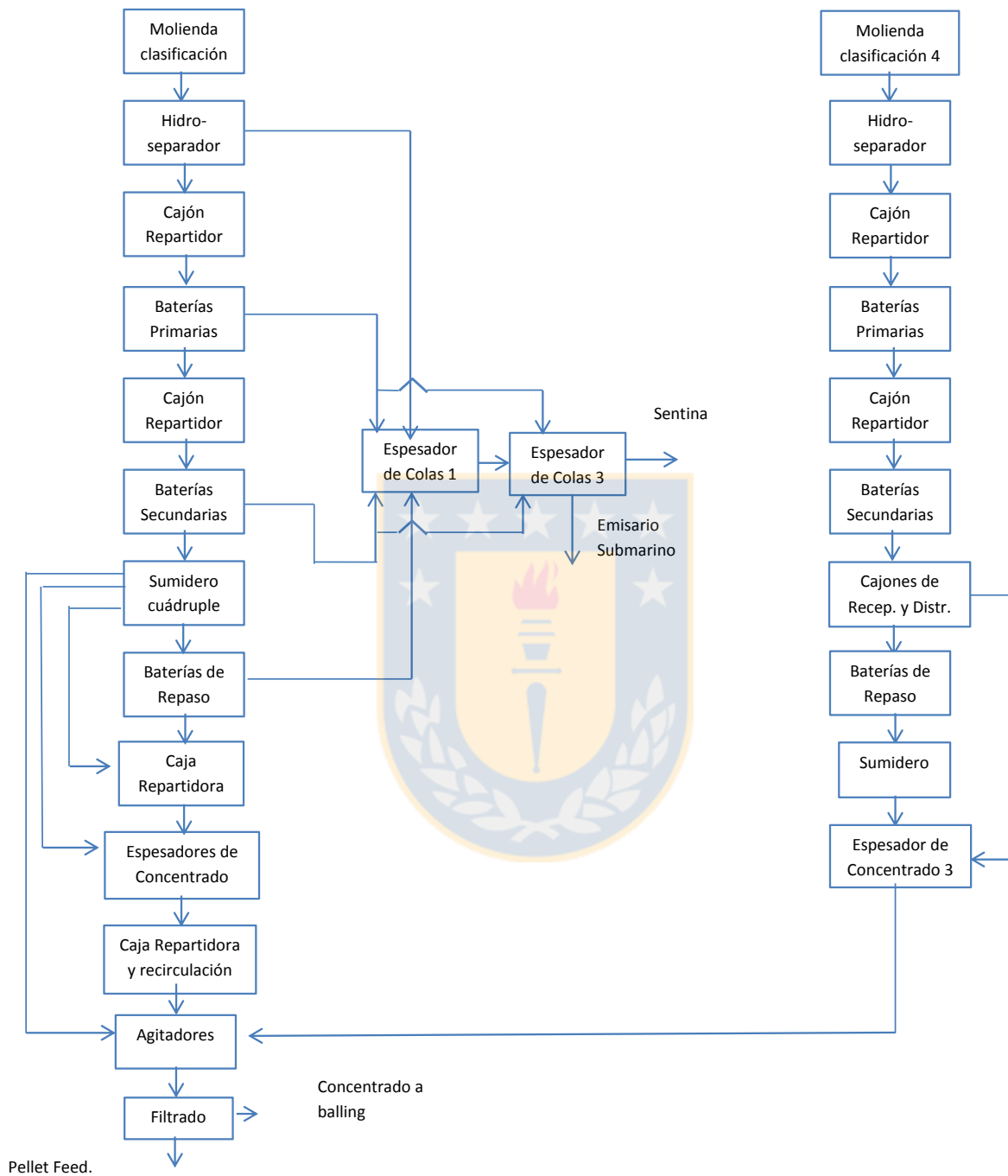


Figura 9: Flowsheet Proceso Molienda Concentración Planta de Pellets Huasco. (Elaboración propia).

## 2.2 Antecedentes del balance másico

En Planta de Pellets para obtener la producción de concentrado diario, se utiliza el valor de Recuperación en peso diaria, como se mencionó en la introducción, calculado por medio de los valores de leyes de alimentación a molino, colas y concentrado. Esta  $R_p$  luego es multiplicada por los valores de alimentación a silos y se obtiene la masa de concentrado.

Con el fin de realizar una comparación entre lo que reporta el método actual y los datos de instrumentación es que se extrajeron valores de alimentación a silos durante cada día del mes de Julio junto con los valores de  $R_p$  de cada día, calculados por medio de los valores de leyes de alimentación a molino, colas y concentrado, de la planilla “Resumen diario de producción Julio” y se obtiene el concentrado diario. El total mensual de concentrado dividido por el total mensual de la alimentación a silos entrega la recuperación mensual correspondiente a  $R_p = 87.96$ . Esta primera forma de cálculo es como se calcula actualmente la recuperación en Planta de Pellets y corresponde a un método común denominado por la literatura como fórmula de “n-productos”, en el cual a partir del flujo másico de alimentación y  $(n-1)$  leyes de elementos muestreados en  $(n+1)$  corrientes se obtienen flujos másicos no medidos. Para este caso la fórmula se reduciría a la fórmula de 2- productos, cola y concentrado, en el que se necesita solo la ley de un elemento de interés muestreado en las tres corrientes.

Ahora, usando los datos obtenidos por instrumentación, flujómetros, densímetros y reporte diario, el sistema calcula la masa de sólido en las colas. Con esta masa de sólido y la alimentación a silos se obtiene el concentrado y Recuperación en peso, o  $R_p$ , por un segundo método que se denominará método de colas. Se aprecia una diferencia entre el concentrado indicado por el método de planta y el método de colas, además por el método actual de cálculo se tiene una recuperación en peso superior que la que se tiene usando los datos de instrumentación. Esta diferencia corresponde a 22600 toneladas, como se ve en la Tabla 1, y significa que, por el método actual se reportan 22600 toneladas más de concentrado producido que lo que reporta el otro método, cantidad que podrían perderse en las colas.

Esta discrepancia puede ser por los errores al realizar el muestreo de las leyes o por fallas en la medición de instrumentación. Sin embargo existe la desventaja, en el método de obtención del concentrado a través de la fórmula de 2- productos, en el que no se consideran los errores en la medición de leyes, el error de la medición del flujo másico de alimentación, ni su propagación en la obtención de la masa de concentrado [1].

Estos valores no son ajustados luego por sus errores, por lo que quedan con un error que no se está considerando. Además, con la fórmula de n-productos no se da solución de forma correcta al problema de conocer los flujos másicos internos de un proceso solo conociendo alimentación y



leyes. Según Wills, B. & Finch, J. (2016) en Mineral Processing Technology [1], la fórmula n-producto no puede ser considerada por mucho tiempo más como un método de balance de masa.

Lo que se recomienda es la realización de balances másicos a través del método de mínimos cuadrados generalizados, el cual considera los errores de la medición y un ajuste a través de factores de peso, proporcional a la confianza que se tiene de las mediciones.

Para conocer las desviaciones de las mediciones de instrumentación, sus errores y la proporción de estos errores respecto a otros instrumentos es que se deben generar y aplicar protocolos de contrastación.

*Tabla 1: Diferencia en concentrado y recuperación en peso, al comparar el método de cálculo actual y el método de cálculo con colas para Julio 2018*

	<b>Total Alimentación Silos</b>	<b>Total Concentrado</b>	<b>Rp</b>	<b>Total Colas</b>
	[ton]	[ton]		[ton]
<b>Método Planta</b>	661440	581803	87.96	79637
<b>Método Colas</b>	661440	559204	84.54	102236
<b>Diferencia Mensual</b>		22599	3.42	-22599

## **2.3 Antecedentes Teóricos**

### **2.3.1. Instrumentos de medición**

#### **Flujómetros**

Instrumento que permite medir el flujo volumétrico o cantidad de flujo que pasa a través de un conducto en un tiempo determinado. Los más usados son los flujómetros magnéticos y ultrasónicos.

#### **Densímetros**

Instrumento que mide la densidad de un fluido que pasa a través de una tubería. Los densímetros nucleares constan de una fuente de radiación (rayos gamma) que atraviesan la tubería con pulpa a una velocidad inversamente proporcional a la densidad de pulpa.

En Planta de Pellets el densímetro de relave está asociado al porcentaje de sólido, esto es que para una determinada gravedad específica de sólido en balanza Marcy, se indica el porcentaje de sólido, el cual es asociado al número de cuentas percibe el densímetro nuclear.

#### **Pesómetros**

Equipo de pesaje que permite determinar el tonelaje de material en movimiento en línea, sin interrumpir el paso del mismo. Consta de una estación de pesaje montada en la cinta donde se transporta el producto y un sensor de velocidad, entregando una señal al integrador que calcula la velocidad de la cinta transportadora, el flujo másico y el peso totalizado [6].

### **2.3.2. Método de ajuste metalúrgico por multiplicadores de Lagrange**

El ajuste de balance metalúrgico con multiplicadores de Lagrange busca la mejor estimación de los valores teóricos minimizando el criterio de los mínimos cuadrados, esto se logra a través de la solución de una serie de ecuaciones que involucran factores de peso. Ver Anexos A.

#### **Factores de peso**

Los factores de peso son una medida de la confianza que se tiene sobre una medición, se asignan de acuerdo a la credibilidad de cada medición, por lo que son inversamente proporcionales al error de la medición. Los factores de peso indican cuanto se debe mover o ajustar una corriente medida. De este modo un valor con mayor factor de peso, es más confiable y su valor ajustado variará menos del valor medido, por el contrario un valor menos creíble, variará más en el ajuste, de su valor medido [7].

$$W_i = \frac{1}{S_i^2} . \quad (2.1)$$

Donde

$W_i$ : Factor de peso.

$S_i$  : Error de los datos de medición.

Para encontrar los factores de peso que asignen un nivel de confianza a los datos entregados por la instrumentación existente en Planta de Pellets, se deben realizar contrastaciones, guiadas a través de protocolos, los cuales indiquen cuál es el nivel de confianza que se tiene en los datos brindados por los instrumentos de medición en línea pesómetros, densímetro, flujómetro.

### 2.3.3. Protocolos de contrastación

Protocolo es el documento o normativa mediante el cual se establece qué se debe hacer frente a una contrastación. Este documento orienta, dirige las acciones, indica el orden del procedimiento y sirve de guía para futuras contrastaciones.

El protocolo de contrastación consiste en la comparación de la medición de un instrumento con alguna otra prueba de referencia, su utilidad en el presente trabajo se orienta a conocer si las mediciones de los instrumentos, ejemplificadas en la curva azul a la derecha, de la Figura 10, están desviadas y en qué proporción frente a un valor o valores en el que se confía que se acerca más al real, ejemplificados en la curva izquierda, de la misma Figura 10. Estas comparaciones se hacen a través de la media de los datos y a través de una serie de herramientas y estadísticos que son mencionados a continuación.

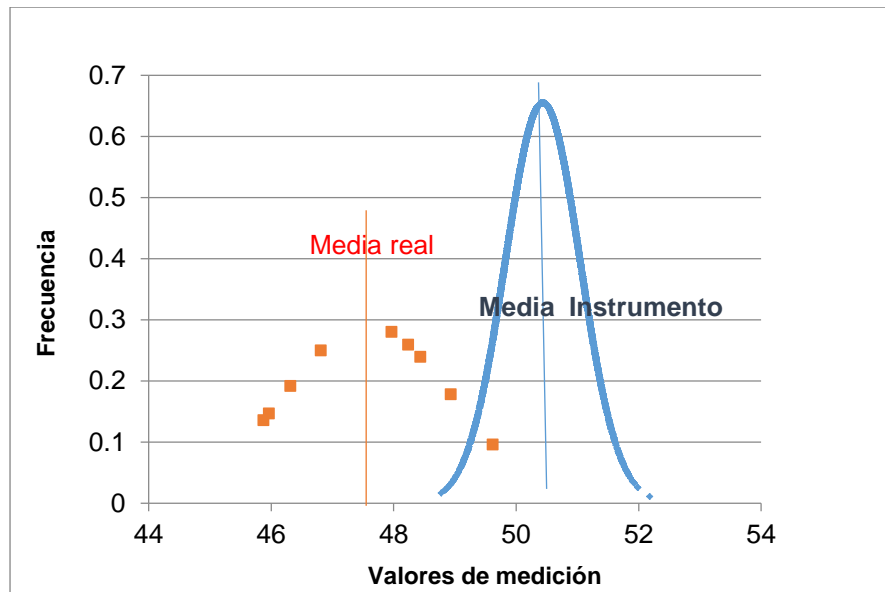


Figura 10: Esquema ejemplo de desviación de un instrumento respecto al valor real. (Elaboración propia).

### 2.3.3.1. Estadísticos en pruebas de contrastación

#### Media y promedio

Medida de tendencia central más usual que es igual al promedio aritmético de un conjunto de datos, que se obtiene al sumarlos y cuyo resultado se divide entre el número de datos.

#### Mediana o Percentil 50

La mediana es igual al valor que divide a la mitad de los datos cuando son ordenados de menor a mayor. Así, para calcular la mediana cuando el número de datos es impar, estos se ordenan de manera creciente y el que quede en medio de dicho ordenamiento será la mediana. Pero si el número de datos es par, entonces la mediana se calcula dividiendo entre dos la suma de los números que están en el centro del ordenamiento [8].

#### Relación entre media, mediana y moda

Si la distribución de datos es normal, la media, mediana y moda toman el mismo valor, como se nota en la Figura 11.

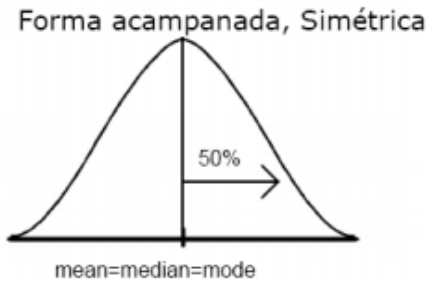


Figura 11: Media, mediana y moda para distribuciones simétrica [8].

Si la distribución es asimétrica con del tipo asimétrica positiva o con cola a la derecha, la media será mayor a la mediana. Tal como se muestra en la Figura 12.

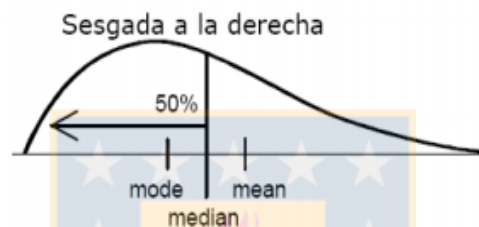


Figura 12: Media, mediana y moda para una distribución asimétrica con cola a la derecha [8].

Si la distribución es asimétrica negativa o con cola a la izquierda, la media es menor a la mediana. Figura 13.

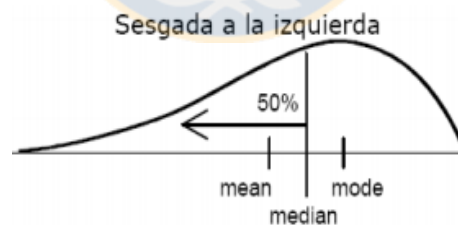


Figura 13: Media, mediana y moda para una distribución sesgada a la izquierda [8].

Cuando la distribución de las observaciones es no simétrica se prefiere la mediana. Esto porque la mediana sigue siendo el valor, bajo el cual se encuentran la mitad de los datos, es decir, el 50% de los datos es menor o igual a este valor y el 50% de los datos es mayor o igual a este y se tiene igual área bajo la curva a la izquierda y a la derecha de este punto. Sin embargo, en el caso de pruebas con solo tres muestras la mediana corresponde al valor central, un sólo valor, que pudo ser un suceso poco representativo.

### 2.3.3.2. Número de muestras y disminución del error

Cuántos cortes realizar o cuantas muestras tomar es una importante cuestión en el muestreo de variables metalúrgicas. Wills, B. & Finch, J. (2016) en Mineral Processing Technology [1] se establece que la varianza de la media de “n” mediciones es “n” veces más pequeña que la varianza de una sola medición, de modo que la desviación estándar o coeficiente de variación de la media de n mediciones es raíz de n veces más pequeña que el coeficiente variación de una medición. Para dos muestreos con  $n_1, n_2$  número de muestras y coeficiente de variación  $CV_1, CV_2$  para una primera y segunda muestra respectivamente, lo anterior se puede expresar como la ecuación siguiente;

$$CV_2 = CV_1 * \frac{\sqrt{n_1}}{\sqrt{n_2}} . \quad (2.2)$$

El porcentaje de disminución o reducción de este coeficiente de variación es;

$$\%Reducción CV = \left( \frac{CV_1 - CV_2}{CV_1} \right) * 100 . \quad (2.3)$$

Ahora para el caso particular en que se toma una sola muestra  $n_1 = 1$ , el porcentaje de variación de la desviación estándar de la media se comporta como;

$$\%Reducción CV = \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{n_2}} \right) * 100 . \quad (2.4)$$

Al graficar esto como el porcentaje de disminución del coeficiente de variación de la media versus el número de cortes “n”. Figura 14, se tiene que a medida que aumenta el número de cortes aumenta el porcentaje de disminución del coeficiente de variación, es decir, el coeficiente o error de la media se hace más pequeño con mayor cantidad de cortes, se nota que a partir de 8 muestra el coeficiente de variación de la media es poco mejorable, por lo que se recomiendan 8 muestras para tener una casi inmejorable desviación estándar de la media de la variable que se quiere conocer y un mínimo de 5 cortes, posición donde la gráfica tiene una pendiente mayor y se tiene una gran disminución del coeficiente de variación conforme aumenta el número de muestras.

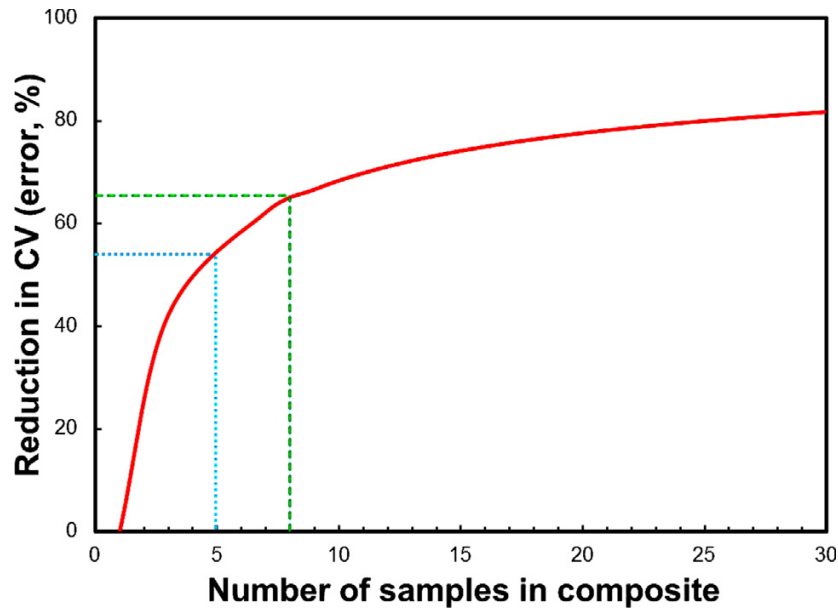


Figura 14: Porcentaje de disminución del coeficiente de variación de la media al aumentar el número de muestras. [1].

### 2.3.4. Pruebas de hipótesis

Es una herramienta de la inferencia estadística útil, cuando más que conocer el valor de un parámetro de la población, se requiere tomar decisiones en base a datos muestrales. Por ejemplo, si se tiene que decidir con base en datos muestrales si hay una diferencia entre la precisión de un medidor y otro.

En estas pruebas lo que se postula o conjetura con respecto a una o más poblaciones se expresa en la forma de hipótesis estadísticas.

Se toma una muestra de la población de interés y se utilizan los datos contenidos en ella para proporcionar evidencia que respalde o no la hipótesis. La evidencia de la muestra que es inconsistente con la hipótesis planteada conduce al rechazo de la misma [9].

Un test de hipótesis tiene principalmente los elementos hipótesis nula, hipótesis alternativa, y riesgo alfa  $\alpha$ .

#### 2.3.4.1. Hipótesis nula y la hipótesis alternativa

Si se está interesado en apoyar firmemente un argumento se debe llegar a este en la forma del rechazo de una hipótesis. Por ejemplo, para apoyar la afirmación de que un tipo de medidores es más preciso que otro, se prueba la hipótesis de que no hay diferencia en la precisión de los dos tipos de medidores.

La estructura de la prueba de hipótesis se establece usando el término **hipótesis nula**, el cual se refiere a cualquier hipótesis que se desea probar y se denota con  $H_0$ . El rechazo de  $H_0$  conduce a la aceptación de una **hipótesis alternativa**, que se denota con  $H_1$  [10].

#### 2.3.4.2. Valor P o nivel de significancia observado

El valor P, de una prueba estadística específica, es la probabilidad, suponiendo que  $H_0$  es verdadera, de observar un valor del estadístico de prueba ( $z$  o  $t$ ) que contradice la hipótesis nula  $H_0$  y apoya la hipótesis alternativa, en por lo menos el mismo grado que lo hace el que se calcula a partir de los datos de muestra. [11].

Esto es que; P es la probabilidad de obtener el conjunto de datos que se quiere ensayar aún cuando la hipótesis nula es verdadera. Sus valores se mueven entre cero y uno y en la práctica indica una medida de lo fuerte de la evidencia de los datos que fueron recopilados en contra de  $H_0$ , o cuanto contradice la muestra, a la hipótesis alternativa. Valores de P pequeños reflejan que es muy infrecuente obtener una muestra como la actual entonces mientras más pequeño sea el valor P, más fuerte será la evidencia de la muestra para rechazar  $H_0$ .

#### 2.3.4.3. Significancia de la prueba o riesgo $\alpha$

Es la probabilidad máxima o riesgo que se estaría dispuesto a cometer en rechazar la hipótesis nula, cuando es cierta, el llamado error tipo I. Esta probabilidad debe ser especificada antes de tomar una muestra, de modo que los resultados que se obtengan no influyan en la decisión.

En la práctica se usan valores de significancia de 0.05 o 0.01, esto es que existe un 5% riesgo o de posibilidades de que se descarte la hipótesis nula cuando es cierta y que se tiene un 95% de confianza de tomar la decisión correcta.

#### 2.3.4.4. Resultado de una prueba de Hipótesis

Cuando se tiene el valor de P con la muestra, la decisión se hará de acuerdo a la regla siguiente;

Si  $P \leq \alpha$  Hipótesis nula será rechazada

$P > \alpha$  No permite rechazar Hipótesis nula

En estricto rigor el resultado de un test de hipótesis es la decisión de rechazar o no la hipótesis nula pero en la práctica si P es estrictamente mayor que el riesgo de una decisión aceptable  $\alpha$ , la hipótesis nula no puede ser rechazada, entonces se da credibilidad a esta hipótesis nula y conduce a la aceptación de una hipótesis alternativa con los datos y evidencia que se tiene [12].



### 2.3.4.5. Prueba t de Hipótesis de comparación de medias de dos muestras

Corresponden a pruebas de hipótesis estadísticas utilizadas cuando se quiere probar la igualdad de dos medias poblacionales pero sus varianzas no se conocen y no se supone igualdad en ellas. Su nombre se debe a que el estadístico de prueba es el t, quien sigue una distribución aproximada a la T de student.

Para llevar a cabo una prueba t de hipótesis de comparación de media se debe determinar primero el estadístico de prueba y los grados de libertad, calculados como se muestra en las ecuaciones 2.5 y 2.6. En las tablas de probabilidad de distribución T student se ubica la probabilidad de tener el valor t, a  $\nu$  grados de libertad. Si esta probabilidad es menor a 0.05 se rechaza la hipótesis nula.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (2.5)$$

$$\nu = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\left[\frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2}{n_1 - 1} + \frac{\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{n_2 - 1}\right]} \quad (2.6)$$

Donde  $\bar{x}_1, \bar{x}_2$  son las medias de la muestras 1 y 2,  $\mu_1, \mu_2$  son la media teórica de las respectivas poblaciones de las muestras 1 y 2,  $S$  es la desviación estándar de la muestra y  $n$  el número de datos de la muestra.

### 2.3.4.6 Estadístico Anderson Darling

El estadístico Anderson Darling mide que tan bien se ajustan los datos a una distribución específica, mientras mejor se ajuste la distribución a los datos, menor será este estadístico.

El estadístico de Anderson-Darling se usa para comparar el ajuste de varias distribuciones con el fin de determinar cuál es la mejor. Sin embargo, para concluir que una distribución es la mejor, el estadístico de Anderson-Darling debe ser sustancialmente menor que los demás [13].

Para obtener este estadístico primero se deben obtener los factores  $A_n$  y  $S$  de las ecuaciones (2.7) y (2.8).

$$A_n^2 = -n - S \quad (2.7)$$

$$S = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (2i - 1) * [\ln F(Y_i) + \ln(1 - F(Y_{n+1-i}))] \quad (2.8)$$

Donde  $Y_i$  son los datos de una muestra ordenados de menor a mayor,  $Y_{n+1-i}$  los datos de la muestra de mayor a menor,  $n$  es el número de datos de la muestra y  $F$  la distribución específica que se espera sigan los datos de la muestra.

Para obtener el estadístico ajustado de Anderson Darling o coeficiente A-D se debe multiplicar el factor  $A_n$  por distintas fórmulas según sea la distribución, por ejemplo para la distribución normal [14]

$$AD = \left(1 + \frac{4}{n} - \frac{25}{n}\right) * A_n^2 \quad (2.9)$$

Las fórmulas para obtener los A-D de distintas distribuciones se encuentra en anexos.

En software estadísticos se calcula el estadístico de Anderson-Darling usando la distancia al cuadrado ponderada entre la línea ajustada de la gráfica de probabilidad (con base en la distribución elegida y usando las estimaciones de mínimos cuadrados) y la función de paso no paramétrica.

#### 2.3.4.7. Software Minitab

En la actualidad existen una serie de programas que automatizan y facilitan la realización de análisis estadísticos como las son las pruebas de hipótesis y la obtención de los coeficientes de Anderson Darling, los que están incluidas en software como Minitab®.

#### 2.3.4.8. Pruebas No Paramétricas

Una prueba no paramétrica es una prueba de hipótesis que presupone que la distribución de la que proviene la muestra no está especificada y con frecuencia se desea hacer inferencias sobre el centro de la distribución. Los métodos no paramétricos son útiles cuando no se cumple el supuesto de normalidad pero utilizan la mediana para realizar comparaciones, las pruebas más utilizadas son la prueba de Wilcoxon para datos pareados y la prueba de Mann-Whitney para datos independientes.

El estadístico U para las pruebas de Mann-Whitney de dos muestras se obtiene de (2.10)

$$U = \min(U_1, U_2) \quad (2.10)$$

$$U_1 = N_1 * N_2 + \frac{N_1 * (N_1 + 1)}{2} - R_1 \quad (2.11)$$

$$U_1 = N_1 * N_2 + \frac{N_2 * (N_2 + 1)}{2} - R_2 \quad (2.12)$$

Donde  $N_1$  y  $N_2$  son los tamaños de muestra del grupo 1 y del grupo 2,  $R_1$  y  $R_2$  corresponde a la sumatoria de los rangos del grupo 1 y 2 respectivamente.

La media y varianza de la distribución U están dadas por (2.13) y (2.14)

$$\mu_U = \frac{N_1 * N_2}{2} \quad (2.13)$$

$$\sigma_U^2 = \frac{(N_1 * N_2) * (N_1 + N_2 + 1)}{12} \quad (2.14)$$

Si  $N_1 + N_2$  es mayor a 20, entonces U tiene distribución casi normal, de modo que se puede utilizar el estadístico Z [15].

$$Z = \frac{U - \mu_U}{\sigma_U} \quad (2.15)$$

El estadístico  $W$  de las pruebas dependientes de Wilcoxon se obtiene como

$$W = \min(W_+, W_-) \quad (2.16)$$

Donde  $W_+$  es la suma de los rangos con signo positivo y  $W_-$  es la suma de los rangos con signo negativo.

Si  $N$ , tamaño de muestra es mayor a 25 se asume que  $W$  se distribuye aproximadamente normal por lo que se puede utilizar  $Z$ , de la forma

$$Z = \frac{W - \frac{N * (N + 1)}{4}}{\sqrt{\frac{N * (N + 1) * (2N + 1)}{12}}} \approx N(0,1) \quad (2.17)$$

### 2.3.5. Condiciones de muestreo de flujos

Para que el incremento o muestra tomada sea representativa se deben cumplir una serie de condiciones [16].

#### Condiciones de geometría del cortador

- El primer borde en tocar el flujo es perfectamente superponible con el último en tocar el borde (los denominados bordes de ataque y fuga respectivamente).
- El flujo a muestrear debe pasar completamente a través de la abertura del cortador, por lo que se recomienda tener una abertura del cortador 3 veces más larga que el flujo para asegurar que todas las partículas entren en el cortador, incluso las que rebotan en el borde del mismo.

#### Condiciones de movimiento

- El cortador debe moverse en forma transversal al flujo. Figura 15 y Figura 16.

- La velocidad debe ser constante.
- Se debe tener cuidado de no perder alguna parte del flujo, es decir que se alcance a muestrear todo el ancho del flujo.
- Por lo anterior se debe tener cuidado en cortadores de ida y vuelta (cuando se corta el flujo en dos pasadas consecutivas) de no regresar demasiado pronto, si no que asegurarse de pasar cada borde, pues es frecuente encontrarse con que se deja una parte del flujo sin cortar, como se muestra en la Figura 17 y la Figura 18.

### Condiciones de Inclinación

- Inclinación del cortador debe ser tal que todas las partículas incluidas los fragmentos que rebotan deben caer dentro del cortador. En la Figura 19 se muestra lo que no debe ocurrir y en la Figura 20 lo que ocurre con una correcta inclinación.
- Se recomienda el uso cortagoteras para recuperar el material que queda adosado a la tubería.

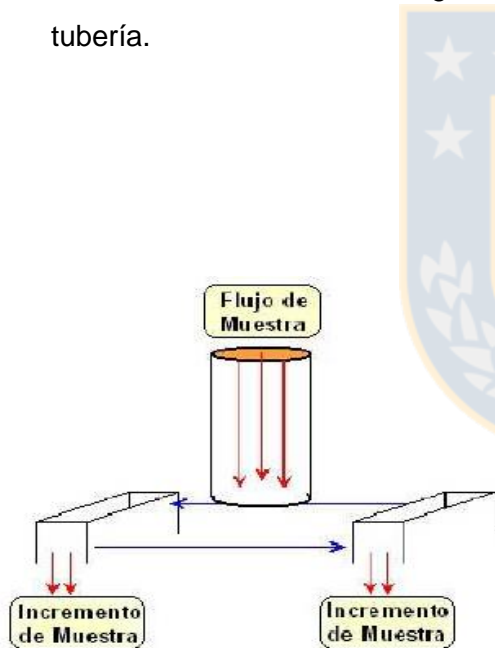


Figura 15: Corte transversal correcto [16].

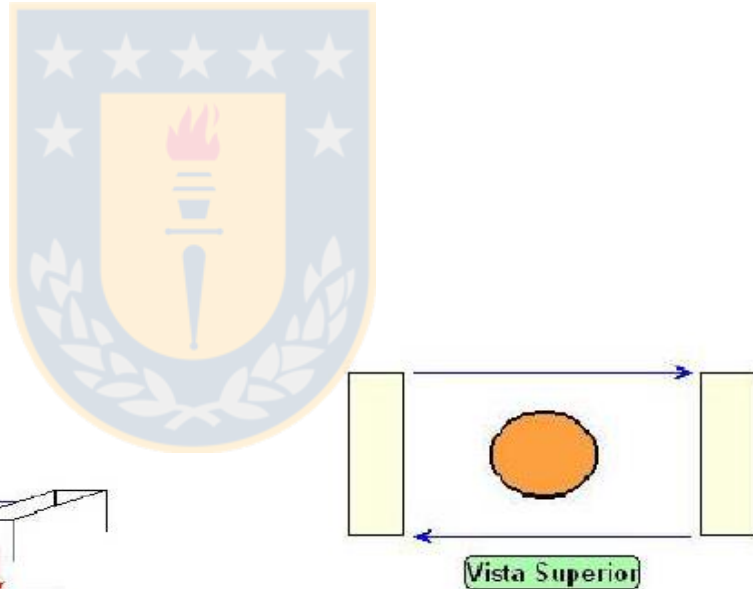


Figura 16: Vista superior corte transversal correcto [16]

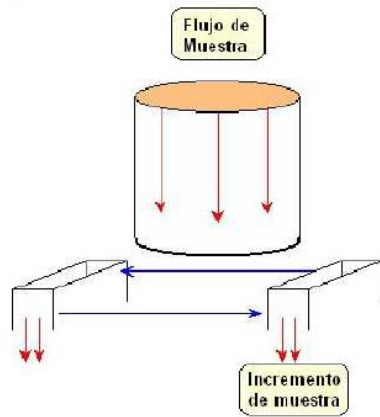


Figura 17: Posición incorrecta de cortador [16].

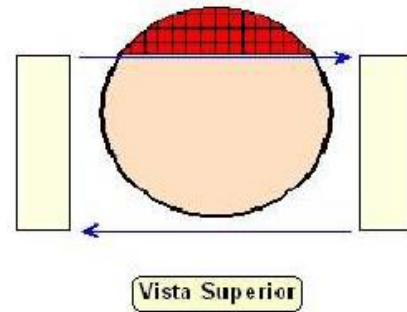


Figura 18: Vista superior corte incompleto [16]

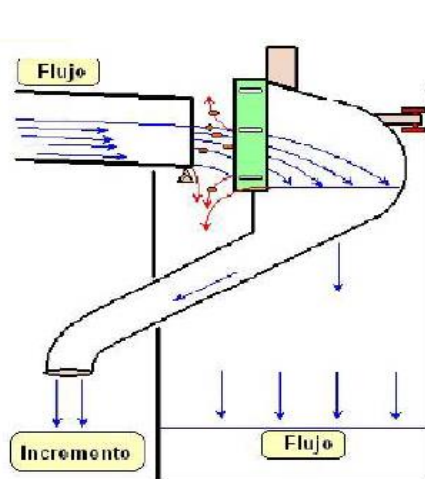


Figura 19: Cortador vertical de inclinación incorrecta [16].

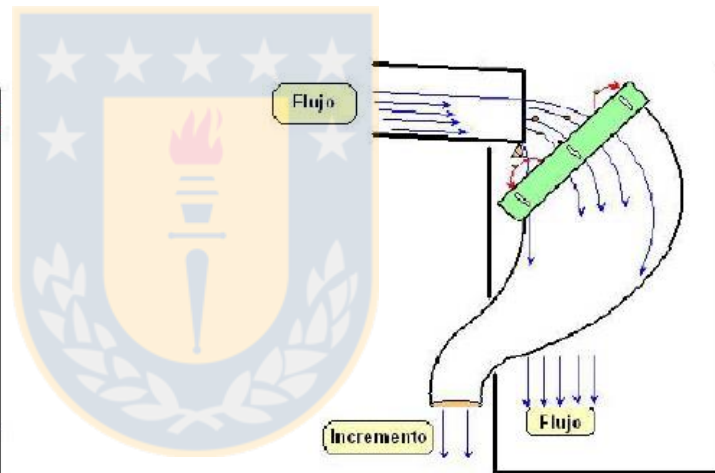


Figura 20: Cortador vertical de inclinación correcta [16].

### 2.3.6. Estados de procedimientos de contrastación en Planta de Pellets

#### Flujómetros

Actualmente en el área de ingeniería de procesos de Planta de Pellets existe un procedimiento para verificar el flujómetro de descarga de relave. En la literatura existen fuentes como Bob Maron, Christian O'Keefe, Alex van der Spek, Philip Stacy. (2011) en Verificación de la precisión de los flujómetros instalados en las plantas de procesamiento de minerales. MAPLA. [17] que mencionan

la contrastación de flujómetros, a través de una prueba de estanque como una buena manera de verificar el funcionamiento completo del sistema de medición de flujo, porque implica el paso de una cantidad medida de fluido a través del medidor, lo que simula una calibración en laboratorio. Sin embargo esta no cuenta con un análisis estadístico de confianza como lo son las pruebas de hipótesis, que determine si la diferencia entre las medias comparadas es de un nivel aceptable para seguir confiando en el medidor, tampoco cuál es su lugar u orden de confianza para la asignación de un factor de peso en el esquema de balance reconciliado.

### **Densímetro**

Para densímetros existía un instructivo de verificación de porcentaje de sólido en la descarga de los espesadores de colas 1 y 3 Figura 9, el cual indicaba sólo 4 muestras para las colas de la descarga del espesador 3. En este no se indicaba como se debía hacer el corte, la cantidad de masa en los tachos, tampoco se señala la desviación aceptable en el densímetro para seguir confiando en su medición, ni una metodología que permita confiar estadísticamente en su contrastación, como las pruebas de hipótesis. Por otro lado con este procedimiento no se logra conocer el orden de confianza que el instrumento tendría frente a otros instrumentos y por lo tanto tampoco su factor de peso.

### **Pesómetros**

Existe conocimiento sobre un procedimiento de control de carga en pesómetros, con un corte de metro y la indicación de set point de la sala de control. Sin embargo no existe un documento sobre esto, ni el detalle del paso a paso de la metodología. Además existe conocimiento sobre otro procedimiento de verificación de pesómetro el que se denominaba método del camado en el cual se realizaba una medición de las dimensiones del material en cajones bajo silo, se estimaba el volumen de este material, y se estimaba la densidad aparente para luego obtener la masa por metro de correa que al ser multiplicada por la velocidad resultaba en el flujo másico pero este último tenía mucha variabilidad en sus resultados.

La importancia de contar con protocolos que tengan la metodología detallada en terreno y de análisis de datos se debe a que la realización de estos puede ser traspasada a la operación con la certeza de que se cumple con la calidad estadística y representatividad requerida.

Además como ya se ha mencionado, estos protocolos son fundamentales para tener el nivel confianza de la instrumentación y sus correspondientes factores de peso, necesarios para un esquema de balance reconciliado.



## **2.4. Antecedentes de equipos acumuladores**

Dentro de Planta de Pellets existen equipos acumuladores tales como silos, agitadores y espesadores.

### **2.4.1 Silos**

El primer equipo dentro del flowsheet de Planta Pellets en que se presenta acumulación es en silos, existen 4 silos, uno para cada molino, dentro de estos, el silo número 1, que alimenta al molino 1, posee un sensor de nivel.

### **2.4.2. Agitadores**

El segundo equipo dentro del flowsheet de Planta de Pellets que presenta acumulación es el agitador, existen dos agitadores, el agitador número uno está destinado a almacenar material que será pellet básico y el agitador número dos para pellet feed,

### **2.4.3. Espesadores**

El tercer equipo que puede presentar acumulaciones dentro de Planta de Pellets son los espesadores. Existen 3 espesadores de concentrado, los espesadores 1, 2 alimentados por las líneas 1,2 y 3 y el espesador 3 alimentado por las líneas 3 y 4, además la planta cuenta con dos espesadores de colas 1 y 3, el espesador de cola 3 es alimentado por el espesador de colas 1.

### **2.4.4. Estado de cálculos de masa acumulada**

En la actualidad, en ingeniería de procesos de Planta de Pellets no se cuenta con una planilla que calcule el material acumulado en silos, agitadores y espesadores. En sala de control se indica el nivel de llenado pero no su equivalencia en masa.

La importancia de contar con la masa acumulada radica en que estas masas acumuladas son consideradas como corrientes dentro del balance másico reconciliado y son necesarias para tener un balance de masa consistente y cumplir con las leyes de conservación.

Tener una planilla que calcule la masa permite también tener una estimación de la capacidad en masa de estos equipos, además si la planilla calcula la acumulación por minuto se conoce cuanto se va acumulando y descargando por minuto, esto significa que se puede saber cuánta masa hay acumulada en cualquier instante del día y cuanta masa se tiene como rango de acción para sostener la producción frente a la detención de la alimentación o la detención de una línea, en el caso de los agitadores.

Por otro lado en los espesadores de concentrado se hace importante conocer si existen acumulaciones puesto que todo el material que ellos contienen es de alto valor y se convertirá en producto pellet feed o pellet básico.

Para el caso de los espesadores de colas existen restricciones medioambientales que se deben cumplir, entre las cuales no se puede descargar más de 4000 toneladas al día de relave y este relave debe tener un porcentaje de sólido mayor al 50%, por la que la estrategia de funcionamiento del principal espesador de colas, número 3, es recibir la descarga del espesador de colas 1 y el relave de la línea 4 para luego recircular hasta alcanzar un mínimo de 50% de sólido. Estas recirculaciones generan acumulaciones que al sumarse al final del día darían una masa que podría ser significativa para el ajuste del balance de masa diario. Además, conocer la acumulación en periodos de tiempo menores a un día es de importancia para no detener líneas de procesamiento por subestimar la capacidad del espesador, esto porque aun cuando se conoce hasta que nivel se puede llenar el espesador, no se conoce con certeza a cuanto material corresponde, así, si se está en la situación en que se han descargado valores de relave cercanos al límite permitido diario, al no tener claridad de cuanta más masa puede acumular el espesador, la operación se verá obligada a disminuir las líneas de producción para no infringir la restricción medioambiental.

## **2.5. Antecedentes de calibración del densímetro de colas**

Cuando se calibra el densímetro de colas se toma una muestra de la pulpa de descarga con el recipiente calibrado de la balanza Marcy y se usa como referencia una densidad de sólido fija en 3 [ton/m<sup>3</sup>], la cual se ubica en la balanza Marcy para que indique el porcentaje de sólido que será ingresado en el densímetro como asociación al número de cuentas que percibe el densímetro en el momento de la calibración.

Analizar cómo se comporta el porcentaje de sólidos al cambiar la densidad de sólido es importante para saber si mantener la densidad de sólido fija en 3 [ton/m<sup>3</sup>] afecta al resultado entregado por el densímetro. Mantener la densidad de sólido fija podría introducir una especie de sesgo que podría estar afectando el resultado entregado por el densímetro y así, afectar el resultado de las pruebas de contrastación.

### **3. Metodología**

A continuación se detallan en la sección 3.1 las metodologías implementadas en los protocolos de contrastación en flujómetro, densímetro y pesómetros, que permitieron la asignación de los niveles de confianza y su correspondiente factor de peso.

En la sección 3.2 se precisan los modelos creados para la determinación de masa acumulada en silos y agitadores, su implementación en Visual Basic y uso en planillas Excel ®. Para el caso de masa en espesadores se realizó un estudio bibliográfico de una forma de cálculo de inventario, se presenta su limitación de implementación en la planta y una existente solución comercial para su cálculo.

Finalmente en 3.3 se expone la metodología utilizada para llevar a cabo el análisis de sensibilidad del densímetro de colas.

#### **3.1 Metodología de contrastación de instrumentos**

En esta sección se especifican las metodologías usadas en las comparaciones de contrastación de flujómetro, densímetro y pesómetros. Estas comparaciones se hacen a través de la media de los datos. Se realiza una mejora en la calidad estadística de las verificaciones existentes por medio de la inclusión de las pruebas de hipótesis, las cuales identifican si la diferencia entre las medias es de importancia estadística o no. Además, en las pruebas de hipótesis se entrega el valor de P, el cual es usado como un indicador de la confianza de la medición del instrumento, lo que permitió asignar los factores de peso.

Por otro lado en este ítem se encuentra el paso a paso para poder llevar a cabo los protocolos de contrastación en terreno, incluyendo nuevos pasos a los existentes procedimientos de verificación de flujómetro y densímetro, según lo aprendido luego de su implementación en terreno y lo rescatado de las normas existentes en la literatura sobre representatividad, y por último el nuevo protocolo de contrastación de pesómetros.

##### **3.1.1 Flujómetro de colas**

La contrastación del flujómetro consiste en comparar los flujos medios del flujómetro y el flujo medio que se tiene en un estanque que se va llenando de una misma pulpa, aprovechando la disposición física de contar con un estanque, al cual se puede dirigir la pulpa que pasa previamente por el flujómetro a contrastar. En esta comparación se tiene como referencia del flujo real el entregado por el estanque y se debe analizar si la diferencia de las medias es estadísticamente significativa.

Con el fin de llevar a cabo este protocolo, se deben seguir una serie de pasos que se detallan a continuación.

### 3.1.1.1. Método de obtención de volúmenes acumulados en estanque y el volumen equivalente del flujómetro

Como se ha mencionado anteriormente las comparaciones de los instrumentos son realizadas a través de las medias, en este caso la comparación en la prueba de hipótesis es efectuada por medio de la media de los flujos. Sin embargo al graficar ambos flujos volumétricos o caudales no se visualiza la diferencia entre ellos, Figura 21, por esta razón y porque el sensor utilizado para medir la altura de llenado en el estanque es altamente sensible, generando valores de flujos negativos, es que lo primero que se hace es una inspección visual de la diferencia a través de la comparación de volúmenes acumulados entre el estanque y el volumen equivalente del flujómetro a verificar.

El volumen en el estanque se obtiene a partir de los datos de nivel de llenado arrojados por el sensor de altura "LIT\_01", ubicado en la parte superior del mismo, se extraen los datos de acuerdo a la hora registrada como inicio de la prueba de contrastación detectando un nivel de llenado de 0%. Como los datos entregados por el sensor son cada un segundo, se cumple con tener más de 8 muestras de volumen y caudal.

Con la equivalencia en metros del 1% de llenado, en el sensor, se procede a calcular la altura de llenado del estanque y su variación con respecto al tiempo para luego con el área obtener el flujo de la forma:

$$Q = \frac{dh}{dt} * A \quad (3.1)$$

Para obtener el volumen se debe proceder a integrar el caudal anterior, con respecto al tiempo

$$V = \int_{t_i}^{t_f} Q * dt \quad (3.2)$$

Esta integral se calcula de forma numérica usando el método de los trapecios, el que va sumando las áreas de pequeños trapecios, donde los lados del trapecio son el flujo a un tiempo  $t_j$  y  $t_{j-1}$  (tiempo anterior) y la base de estos es el delta de tiempo. Entonces, el área de este trapecio y la integral anterior son:

$$\text{Área trapecio} = \text{base} * \frac{(l_0 + l_1)}{2} \quad (3.3)$$

$$V = \int_{t_i}^{t_f} Q * dt \approx \sum_{j=t_i}^{j=t_f} \Delta t * \frac{(Q_j + Q_{j-1})}{2} \quad (3.4)$$

Para obtener el volumen equivalente del flujómetro se debe proceder a integrar el flujo, entregado directamente por el flujómetro, de la forma anteriormente mencionada en la fórmula (3.2).

Como estos volúmenes se están acumulando, se debe sumar el volumen anterior en la fórmula (3.4).

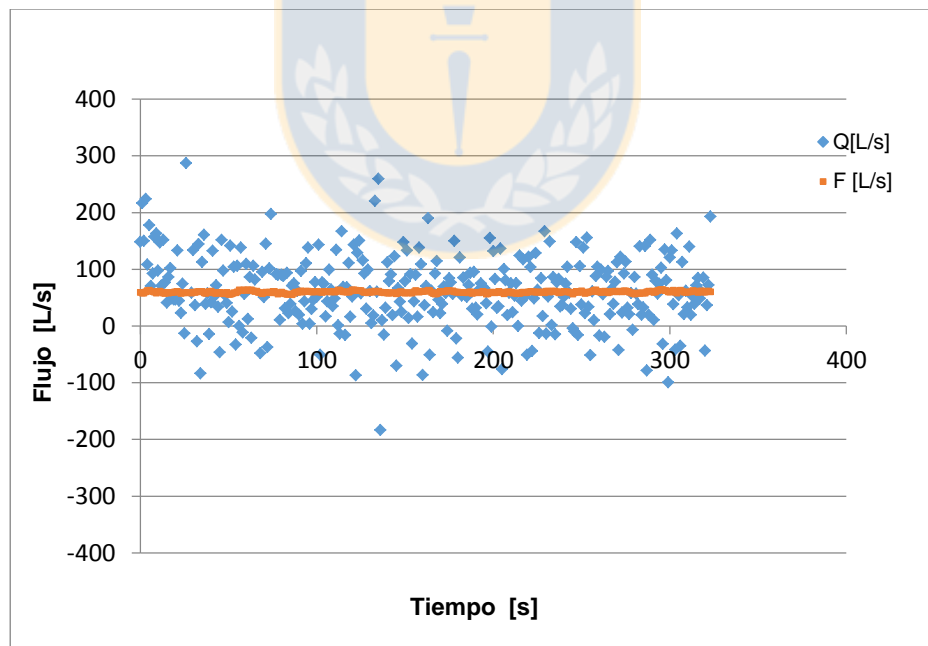


Figura 21: Comparación de flujos entre flujo en estanque y flujo en flujómetro.

### 3.1.1.2. Comparación entre las gráficas de aumento de volumen acumulado en el estanque y flujómetro

Con los volúmenes anteriores se genera una gráfica del aumento de volumen en el estanque y aumento de volumen acumulado en el flujómetro con respecto al tiempo. En la gráfica del aumento de volumen en el estanque, en la Figura 22 se tiene un primer segmento de ascenso brusco de volumen, el cual es efecto de abrir válvulas que detenían el paso de pulpa y mientras se abren hasta cierto porcentaje determinado, va aumentando la velocidad de la pulpa. Esto se debe eliminar ya que afectan en el cálculo de las pendientes de las rectas en la gráfica. De la misma forma se debe eliminar el segmento final horizontal, si lo hubiera, de la curva del volumen del estanque y de la curva del volumen del flujómetro ya que esta sección horizontal corresponde al hecho de que el flujómetro ya no recibe flujo y el estanque ha estabilizado su volumen afectando otra vez a las pendientes.

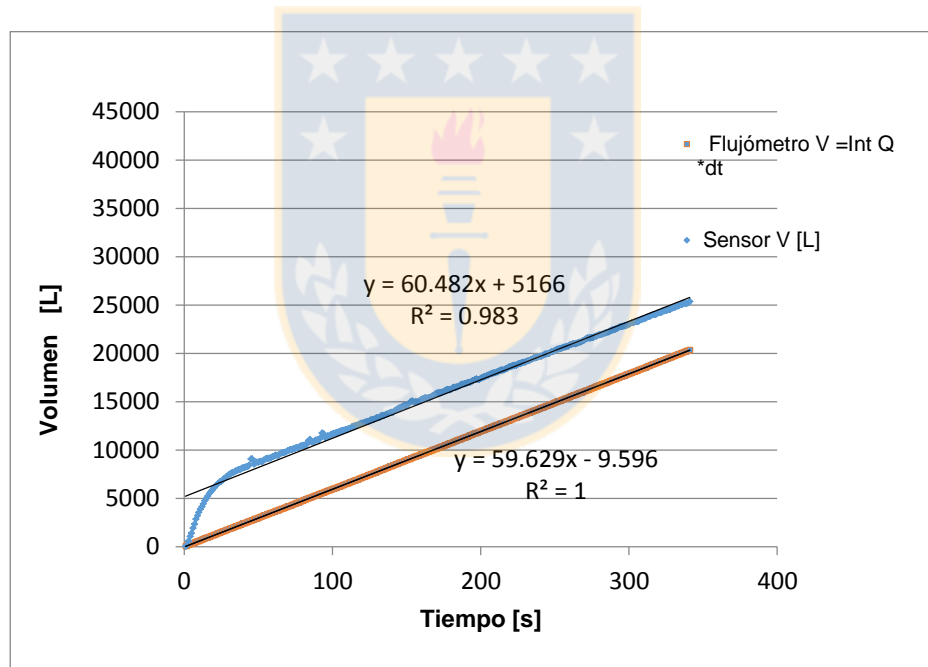


Figura 22: Gráficas de aumento de volumen en el tiempo, considerando todos los datos de altura del sensor LIT\_01A

Para eliminar la primera sección de la curva se debe mover en 18 segundos la curva de acumulación de volumen en el estanque, de modo que si se considera que el primer dato extraído del sensor corresponde al primer segundo de prueba se le deben restar 18 segundos y luego se

debe graficar nuevamente el volumen desde el nuevo tiempo cero hasta el primer volumen constante, resultando como la Figura 23.

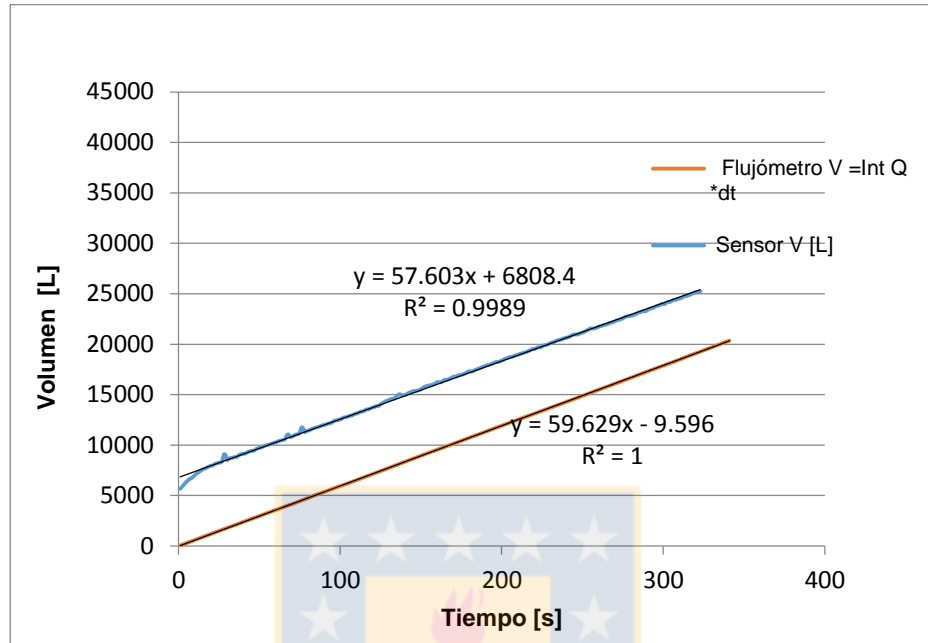


Figura 23: Gráficas de aumento de volumen en el tiempo para flujómetro y sensor

Con el fin de evitar datos con perturbaciones, saltos o datos extraños que puedan alterar el resultado del análisis se grafica la distribución del volumen, se selecciona el noventa por ciento de los datos más probables de volumen, eliminando así el rango de datos más pequeños donde podrían quedar datos con fluctuaciones captadas por el sensor debido a la presión con la que viene el fluido. Para generar esta eliminación de datos se utiliza una gráfica de probabilidad de distribución y su mejor ajuste, donde se determina el límite inferior para el cinco por ciento de los datos menos probables y el límite superior bajo el cual es probable encontrar el noventa y cinco por ciento de los datos y sobre el cual se elimina el cinco por ciento que se escapa de los límites de la distribución más probable que en este caso es del tipo Weibull. Tal como se muestra en la Figura 24 y la Figura 25.

El mismo procedimiento de selección del noventa por ciento de los datos más probables es adoptado para los datos de volúmenes obtenidos desde los datos de flujo medidos por el flujómetro FIT 798, figuras 26 y 27.

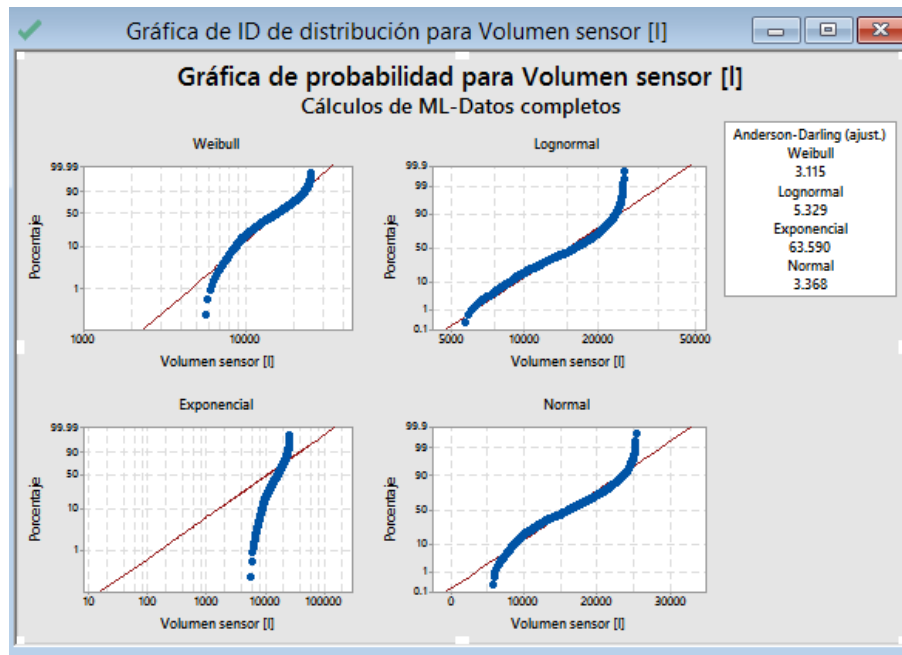


Figura 24: Gráficas de probabilidad de distribución para el volumen calculado en el estanque a partir del sensor de altura en prueba de contrastación flujómetro.

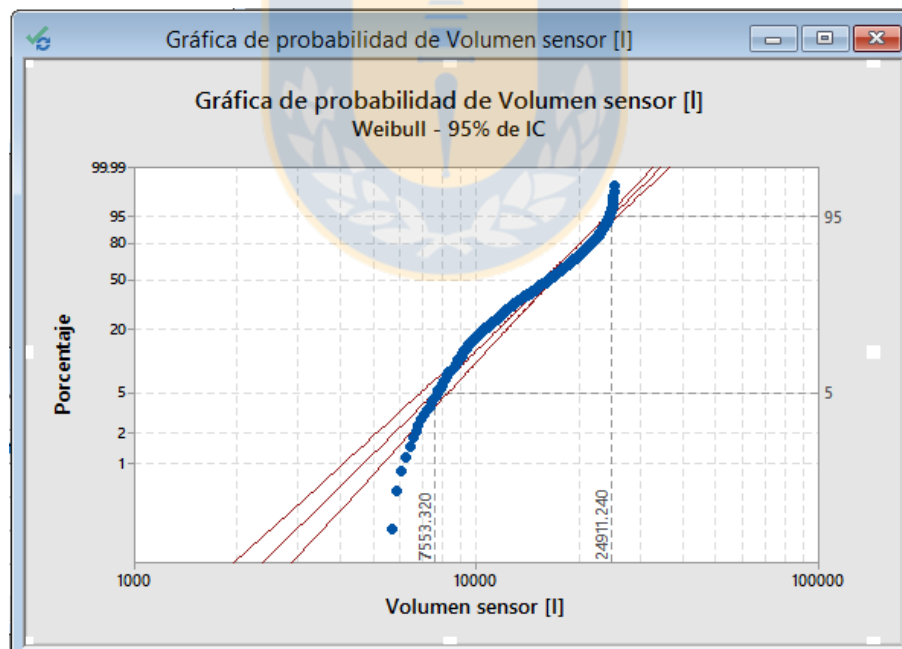


Figura 25: Gráfica de la distribución que mejor se ajusta a los datos de volumen calculados a partir del sensor de altura y límites del noventa por ciento de los datos dentro de esta distribución.



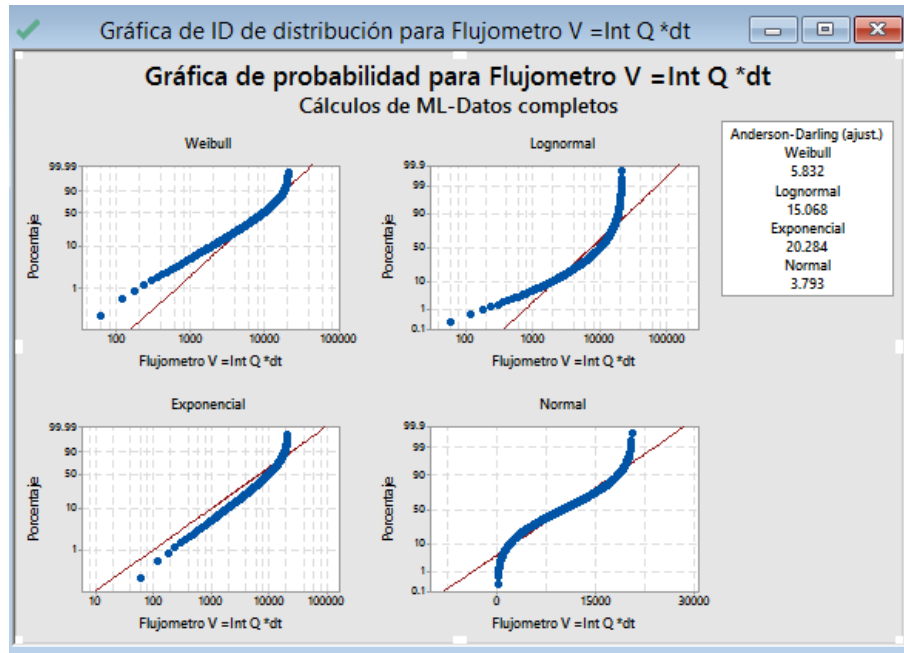


Figura 26: Gráfica de probabilidad de distribución para el volumen adquirido desde los datos de flujo extraídos del flujómetro FIT 798.

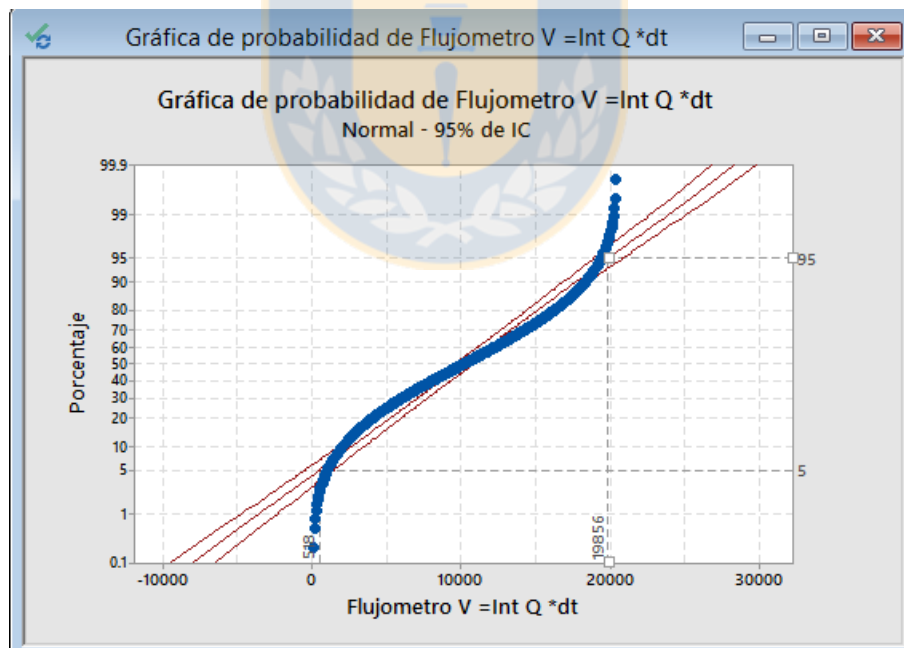


Figura 27: Gráfica distribución con mejor ajuste a los datos de volumen obtenidos a partir de los datos extraídos por el flujómetro FIT798.

Con los datos de volúmenes filtrados se genera una nueva gráfica de comparación de volúmenes entre el flujómetro y el sensor. Figura 28. Esta nueva gráfica tiene un leve cambio de pendiente, el cual se debe a que Excel ® ajusta a una recta descartando datos. Sin embargo, este descarte de datos es favorable para excluir datos de caudal extraños y en los que en el caso de datos adquiridos a través del sensor, si provoca cambios en la media.

Las pendientes de la gráfica representan el flujo promedio de cada método durante un comportamiento lineal. Estas permiten tener una inspección visual de la discrepancia entre el flujómetro y el método de contrastación, una estimación de la diferencia en [L/s] y el porcentaje que esa diferencia representa en el flujómetro.

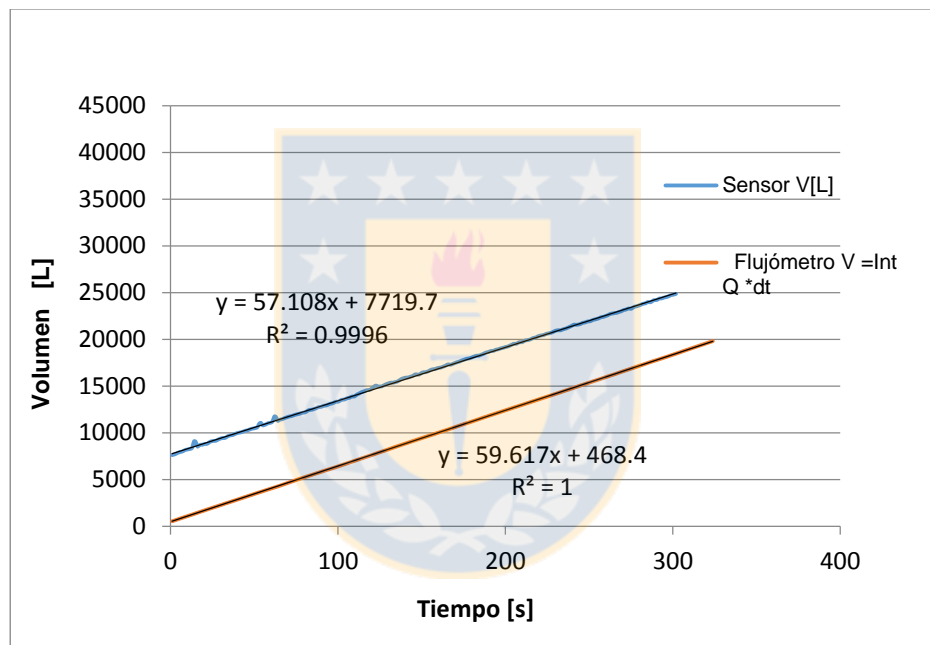


Figura 28: Gráficas de aumento de volumen para flujómetro y sensor una vez aplicado el filtro del noventa por ciento de los datos.

### 3.1.1.3. Prueba de hipótesis t de igualdad de medias para dos muestras

Con la gráfica anterior se tiene una referencia de las diferencias existentes entre el flujómetro y el método de contrastación del protocolo pero para saber si esta diferencia es estadísticamente significativa se debe recurrir a un análisis de pruebas de hipótesis. Para ello se usan los datos filtrados de caudal y se ingresan al programa Minitab ® para luego someterlos a una prueba de hipótesis en estadísticas, estadísticas básicas, t de dos muestras. En este análisis y tal como se

explicó en los antecedentes teóricos si  $P < 0.05$  se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias y se inferencia que los instrumentos están midiendo flujos distintos.

#### 3.1.1.4. Procedimiento en terreno para contrastación de flujómetro

Para obtener los datos de volumen y flujo en el estanque y conocer el intervalo de tiempo en que se deben rescatar los datos del flujómetro se tienen que seguir una serie de instrucciones en terreno las cuales se detallan en el anexo B. El procedimiento en terreno usado para la presente memoria de título fue con el que ya se contaba en el área de ingeniería de procesos de Planta de Pellets, en el que se debe subir sobre el estanque TK-17, Figura 29 y 30, y medir el área como muestran la Figura 31. Pero además, se agregaron los puntos 12) y 13) los cuales indican que se deberían considerar sólo los datos del sensor por sobre un 10% de llenado, pues los datos menores a esto contienen mucha variación y que es necesario contar con dos personas provistas de radio, una ubicada frente a la pantalla de indicación de nivel verificando que el nivel no sobrepase el 60% en la prueba y otra persona en la parte superior del estanque verificando misma situación para no correr el riesgo de embancar el estanque.



Figura 29: Estanque TK-17



Figura 30: Ascenso de personal al estanque TK17



*Figura 31: Medición de dimensiones en parte superior del estanque*

### **3.1.2. Densímetro**

La contrastación del densímetro de colas se basa en comparar los porcentajes de sólidos medios del densímetro con el porcentaje de sólido medio, que se tiene al recolectar 9 muestras desde una tubería que lleva el relave desde el espesador de colas 3 al dropbox A, donde la pulpa cae. Estas 9 muestras son llevadas al laboratorio Mademet, donde son filtradas y secadas para obtener la masa de sólido de la pulpa muestreada. En esta prueba se tiene como referencia del porcentaje de sólido real, el entregado por laboratorio. Ambos porcentajes de sólido se someten luego a una prueba de hipótesis para conocer si la diferencia es estadísticamente significativa. El procedimiento completo para llevar a cabo esta contrastación se detalla a continuación.

#### **3.1.2.1. Obtención de porcentaje de sólido en laboratorio**

Para poder llevar a cabo la contrastación de densímetro, como se mencionó anteriormente, primero se deben obtener muestras de pulpa que ya pasaron por el densímetro a las que les pueda determinar su porcentaje de sólido en laboratorio para luego obtener una media que pueda ser comparada con los datos entregados por el densímetro.

Los porcentajes de sólido de laboratorio se obtienen a partir de 9 muestras de relave, correspondiente a la descarga del espesador de colas 3, que son tomadas a la salida de una tubería, ubicada en el Dropbox A, Figura 33. Estas muestras deben ser cortadas abarcando todo el ancho del flujo utilizando el instrumento de la Figura 35, luego se recopilan en baldes ya masados y lavados previamente, logrando aproximadamente 2 [kg] de muestra. Así, la masa de la pulpa se determina en laboratorio Mademet según:

$$M_p = M_{balde+pulpa} - M_{balde} \quad (3.5)$$

Luego la muestra de pulpa se filtra y se traspasa a una bandeja previamente masada que va a un horno para terminar de eliminar la humedad, obteniéndose la masa seca.

$$M_{seca} = M_{bandeja+m\ seca} - M_{bandeja} \quad (3.6)$$

Luego el porcentaje de sólido, según lo entregado por laboratorio, es calculado como la razón entre la masa seca y la masa de pulpa.

$$\% \text{ sólidos} = \frac{M_{seca}}{M_{pulpa}} * 100 \quad (3.7)$$

### 3.1.2.2. Comparación de las distribuciones de porcentajes de sólidos entre el método de laboratorio y el instrumento

Con los 9 porcentajes de sólidos obtenidos desde la información de laboratorio y los porcentajes de sólidos extraídos desde el historian (plataforma que historiza la medición online de los instrumentos en Planta de Pellets Huasco) del densímetro en la hora de la prueba se genera una gráfica de frecuencia versus valores de porcentaje de sólido, obteniéndose las distribuciones para ambos métodos como muestra la Figura 32, en cuyo lado izquierdo se encuentra la gráfica de distribución de porcentajes de sólidos entregados por laboratorio. Estos aparecen como puntos de un curva debido a que corresponden a muestras puntuales y en el lado derecho de la misma figura se encuentra la curva de distribución de los datos solicitados en el historian entre los minutos que dure la prueba. Con estas curvas se tiene un inspección visual de la diferencia existente entre lo que indica el densímetro a contrastar y el método de obtención de porcentaje de sólido de laboratorio, en el cual se confía se acerca más al valor real.

Al calcular las medias de cada distribución se puede obtener la diferencia entre medias y el porcentaje que esta diferencia representa en el densímetro.

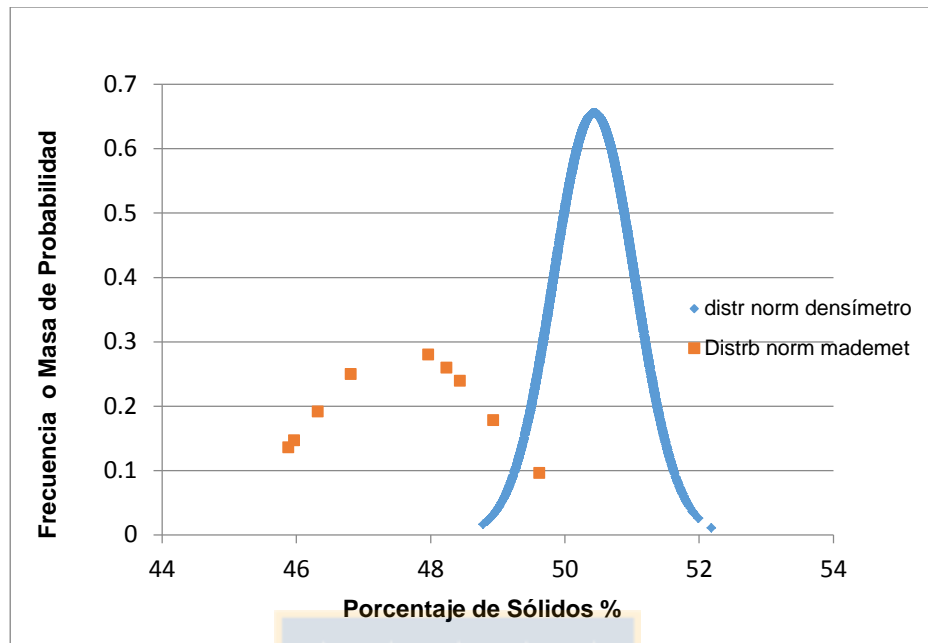


Figura 32: Comparación entre las distribuciones de porcentaje de sólidos arrojadas por el densímetro y por el laboratorio

### 3.1.2.3. Prueba de hipótesis t de igualdad de medias para dos muestras

Al igual que para el flujómetro una vez obtenidas las medias de porcentaje de sólido de ambos métodos se comparan a través de una prueba de hipótesis usando el criterio de  $P < 0.05$  se rechaza la hipótesis nula de igualdad de medias, se inferencia que los instrumentos están midiendo densidades distintas y se debe revisar.

### 3.1.2.4. Procedimiento en operaciones para contrastación de densímetro.

Para obtener una adecuada muestra en cuanto a calidad (menor error en la media) y representatividad del porcentaje de sólido que pasa por el densímetro y conocer el intervalo de tiempo en que se deben rescatar los datos del densímetro para realizar la comparación, se deben realizar una serie de actividades en terreno las cuales se detallan en el anexo C. Estas actividades son una modificación y mejora al instructivo de verificación para densímetros con el que contaba Planta de Pellets, en el que se debe ir a tomar la muestra en el Dropbox A. Figura 33.

Al anterior instructivo se añadieron los pasos; 2) de contar con 9 muestras, para lograr disminuir el error de la media como se describe en 2.3.3.2. Número de muestras y disminución del error (Antecedentes Teóricos) por lo que se necesita el retiro y masado de nueve baldes del laboratorio Mademet. Figura 34 y Figura 37. El paso 4) de lavado del cortador de muestras para evitar el

remanente de otras muestras. Figura 36, paso 6) de la forma de toma de muestra para obtener una muestra representativa, según 2.3.5. Condiciones de muestreo de flujos (Antecedentes Teóricos), por lo que se corta tres veces (una ida, vuelta y otra ida) en la línea de descarga del espesador de colas 3, tratando de abarcar todos los bordes del flujo e ir llenado el recipiente de corte, Figura 37 y Figura 38, esto se debe repetir dos veces para completar una masa superior a los 2 [kg], necesaria para disminuir variabilidades, además el corte debe ser tal que atravesase toda la descarga y en el que todas las partes del incremento entren al cortador por lo que se debe tratar de mantener una velocidad constante de cortado. El paso 8) de traslado y registro de derrames para no utilizar la muestra que ha sido derramada. Figura 39.

La actualización del procedimiento realizado durante la memoria de título es además el vigente procedimiento usado por operaciones todos los viernes para informar y controlar el porcentaje de sólido.



Figura 33: Lugar de corte de muestra. Dropbox A



Figura 34: Masado y rotulado de recipientes



Figura 35: Instrumento cortador de muestras colas



Figura 36: Lavado de cortador de muestras para densímetro





Figura 37: Nueve tachos dispuestos para ser llenados, en el lugar de muestreo



Figura 38: Llenado de baldes con pulpa cortada

 A photograph of a data recording table with a grid. The table has several columns and rows, with some handwritten entries. The table is overlaid with a semi-transparent logo of the United Nations.
 

Tabla 3. Registro de hora de inicio, finalización, masas recipientes y derrames				
Fecha	Hora de inicio	Hora de finalización	Masa de recipientes	Masa de derrames
01/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
02/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
03/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
04/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
05/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
06/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
07/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
08/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
09/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
10/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
11/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000
12/01/2020	08:00	10:00	10.000	0.000

Figura 39: Tabla de registro hora de inicio, finalización, masas recipientes y derrames

### 3.1.3. Pesómetro

Las contrastaciones de los pesómetros consisten en comparar el flujo másico medio del pesómetro en cuestión y el flujo másico medio obtenido con la velocidad de la correa y el corte de 3 veces un metro de correa ubicados posteriores al pesómetro, luego este material es retirado y masado. En esta contrastación se tiene como referencia del flujo másico real, el entregado a través de los cortes. Luego estos flujos másicos se deben someter a una prueba de hipótesis para analizar si la diferencia entre la media de los flujos másicos es estadísticamente significativa.



En esta prueba existen las limitaciones del largo de la correa y el tiempo de prueba, el largo de correa, en general no es el suficiente para obtener las 8 muestras recomendadas y el tiempo de detención para aquello afectaría la producción, por lo que se ha fijado un mínimo de tres muestras por correa para poder realizar la contrastación.

En la Figura 40 se ubican algunos de los pesómetros que serán contrastados y para llevar a cabo esta contrastación se deben seguir una serie de pasos que se explican a continuación.

### **3.1.3.1. Obtención de flujos máxicos del pesómetro**

Para poder realizar la contrastación en pesómetros se necesitan flujos máxicos obtenidos a través de cortes de correa a los que se le pueda determinar una media a comparar con los datos entregados en línea por el pesómetro.

Para obtener el flujo máxico de los cortes, primero se debe contar con la velocidad de la correa la que se verifica a través de tomas de velocidad, en las que se determina la distancia entre dos puntos de la correa, antes y después del pesómetro. Estos puntos quedan marcados en la estructura que protege la correa y se mide el tiempo que tarda otra marca en la correa, las que pueden ser marcas con spray a una distancia adecuada o marcas propias de la correa, en pasar por estos dos puntos.

Para obtener los lugares donde realizar el corte, se lanzan testigos a la correa, desde la sección anterior al pesómetro, separados por segundos tales que ubiquen el primer testigo donde se quiere realizar el tercer corte, el segundo testigo en el segundo corte y el tercer testigo en el primer corte. Por otro lado, al pasar estos testigos por el pesómetro se tiene una medición puntual del flujo máxico indicador en el pesómetro lo que permite tener un rango más acotado para rescatar los datos de historian.

Si en la correa se tiene distribución ondulatoria del material los testigos deben ser introducidos en un valle, en un peak y en el medio de un valle y peak de modo que los cortes sean entre dos valles, entre dos peaks, entre un peak y un valle y tener un promedio más representativo.

Una vez detenida y bloqueada la correa se procede a medir 50 cm hacia la izquierda y derecha del testigo para posar el instrumento de corte de un metro en esos bordes. El material luego es traspasado a bolsas con la ayuda de palas para finalmente ser llevado a masado.

Con las toneladas promedio en un metro y la velocidad de la correa se puede obtener el flujo máxico de los cortes de la siguiente forma:

$$\text{Flujo másico} \left[ \frac{t}{h} \right] = \text{Masa en metro} \left[ \frac{t}{m} \right] * \text{Velocidad correa} \left[ \frac{m}{h} \right] \quad (3.8)$$

Este flujo másico es comparado con el flujo másico medio extraído del historian durante el tiempo de inicio de la prueba y detención de la correa, ubicando los flujos másicos puntuales en él.

### 3.1.3.2. Comparación entre las gráficas de flujo másico obtenidos en los cortes y el flujo másico indicado por pesómetro

Con los datos de flujo másicos extraídos del pesómetro a contrastar, se genera un gráfica de los valores adquiridos en el pesómetro y de su comportamiento, desde el comienzo de la prueba hasta después de la detención de la correa, de modo de poder obtener visualmente donde se ubica el rango de tiempo, justo antes a la detención en el que es probable encontrarlos flujos másicos que fueron cortados. Lo que en la Figura 41 [a] corresponde a un periodo de tiempo anterior a las 11:00 am. A continuación se busca el periodo de tiempo en el que el flujo másico se mantuvo más estable, sin saltos. Esto, avalado en la petición que se hace en terreno de un determinado set point y de carga estable antes de comenzar el lanzamiento de testigos y determinar los puntos a cortar. La gráfica de este periodo estable será de la forma mostrada en la Figura 41 [b], que en este caso transcurre desde las 10:40:52 a las 11:00 hrs. Si bien en esta gráfica aún se notan saltos, aunque menores a los mostrados en Figura 41 [a], no son de mayor preocupación pues datos raros se eliminarán en un procedimiento explicado más adelante.

A fin de tener un rango más acotado de datos a comparar, dentro de los datos de comportamiento más estable extraídos del historian del pesómetro, se ubican los flujos másicos puntuales anotados en terreno y se toman los datos de un par de minutos antes y después de los puntuales para luego ser llevados Minitab ®. Muchas veces obtener los datos puntuales no es posible por lo que se ingresa un rango más amplio de datos entre los cuales se podrían encontrar saltos en el flujo másico debido a acumulación de material en los silos que luego es descargada de forma intermitente, los que se convierten en datos no representativos o outliers por lo que en estos casos se hace aún más importante el uso de alguna herramienta estadística como Minitab ® que determine la correcta eliminación de datos.

Una vez ingresados los datos seleccionados a Minitab ® se procede a determinar el tipo de distribución que mejor los representa, con la ayuda de la herramienta análisis de distribución de Minitab ®, como muestra la Figura 42. La distribución con el menor coeficiente de Anderson – Darling A-D corresponde al mejor ajuste y con la ayuda de la herramienta de gráfica de probabilidad, se grafica la distribución de mejor ajuste y se procede a determinar los límites de



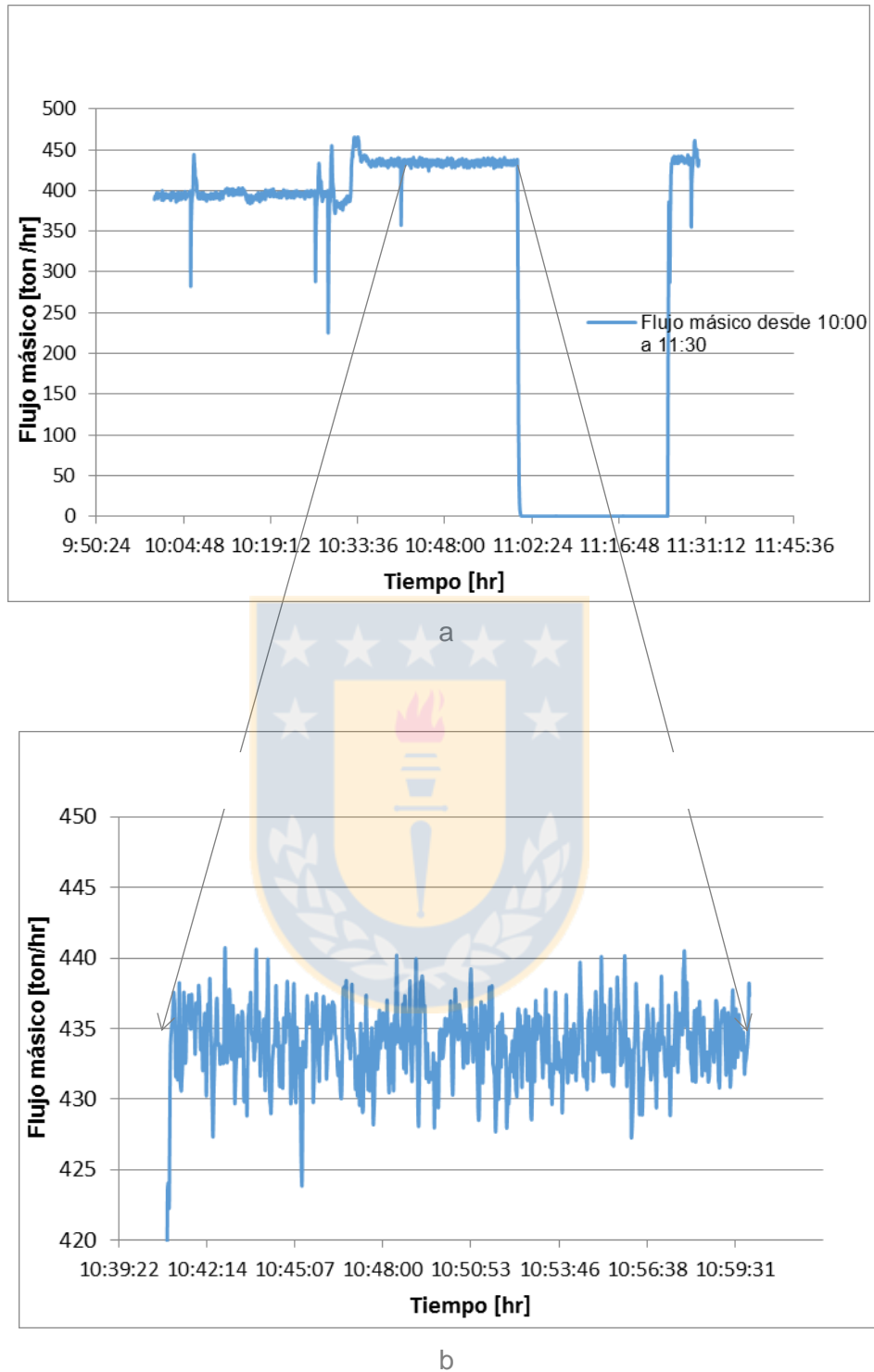


Figura 41: [a] Comportamiento del flujo másico en pesómetro de alimentación a molino 4, desde el comienzo de la prueba 10:00 am hasta 11:30, luego de la detención de correa. Para el día 28 de Noviembre. [b] Flujo másico en el periodo de comportamiento más estable, desde las 10:41:52 hasta las 11:00 hrs.

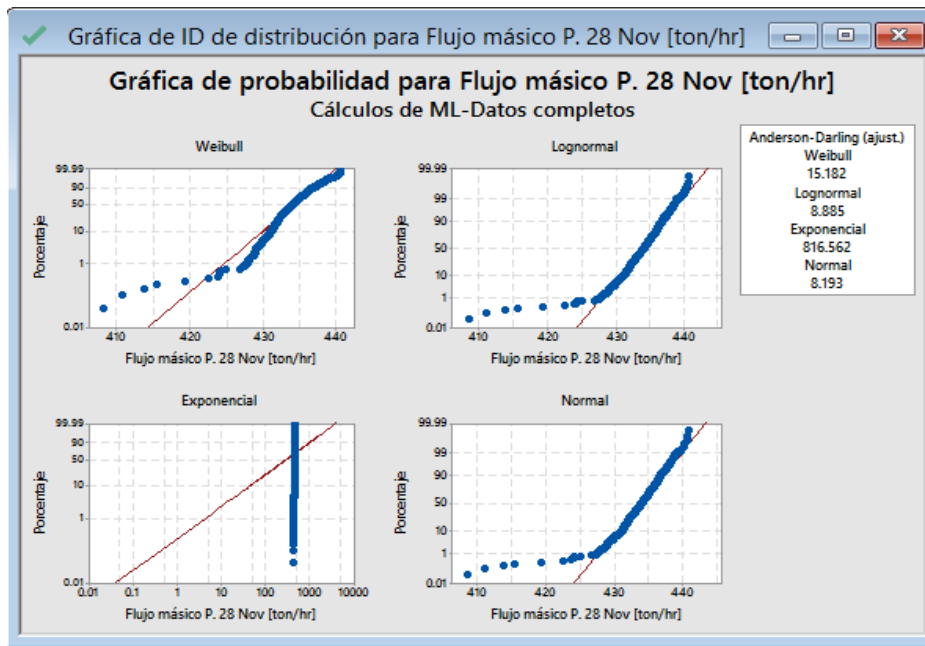


Figura 42: Gráficas de probabilidad de distribución en minitab para los datos de comportamiento más estable dentro de la prueba de contrastación de pesómetro

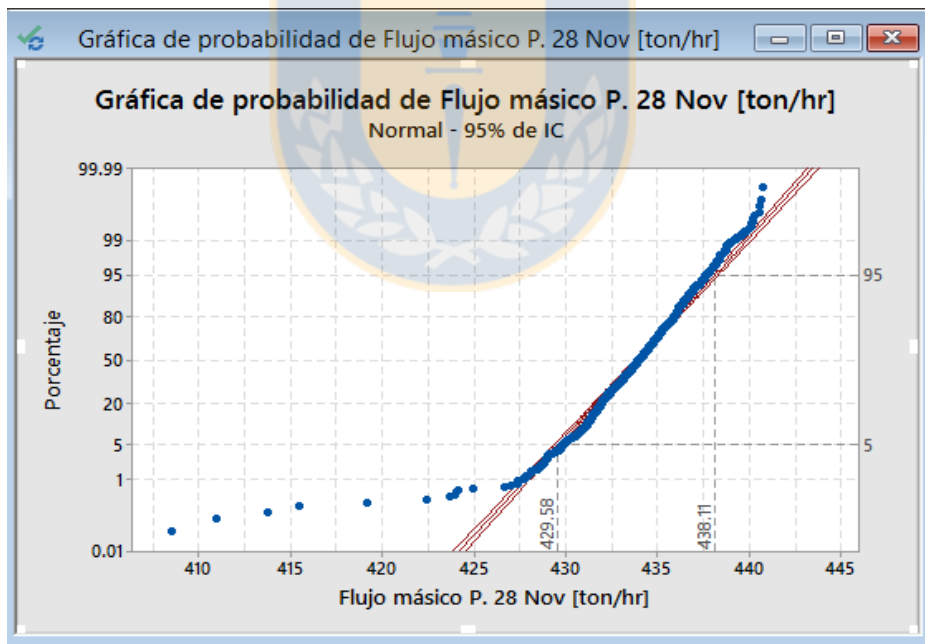


Figura 43: Gráfica de la distribución con mejor ajuste para los datos seleccionados del pesómetro y los límites entre los cuales se encuentran el 5% y el 95% de los datos.

### 3.1.3.3. Prueba de hipótesis t de igualdad de medias para dos muestras

De la misma forma que en las metodologías de contrastación de los instrumentos mencionados anteriormente se debe averiguar si la diferencia entre sus medias es estadísticamente significativa para lo que se hace uso de la prueba de hipótesis t en Minitab ®. Con los mismos criterios de rechazo que se mencionaron en las pruebas anteriores.

### 3.1.3.4. Procedimiento en operaciones para contrastación de pesómetro

Para poder tener la velocidad, sitios donde realizar el corte que permita obtener los flujos máxicos a contrastar, flujos máxicos puntuales que limiten la extracción de datos desde el historian, forma de detención de correa y forma de extracción de material se deben seguir una serie de instrucciones en terreno. Estas actividades se basan en el conocimiento existente de operaciones de un control de carga que comparaba un corte con un set point. Por primera vez el procedimiento es documentado mediante el trabajo de memoria y mejorado aumentado los cortes y señalando detalladamente cada uno de los pasos, que luego de repetidas pruebas en terreno permitieron finalmente llegar a las actividades descritas en la lista siguiente:

- 1) Coordinar prueba, con el jefe de molienda y jefe de operación de molienda, el día anterior a esta, solicitando correa, hora más apropiada para la prueba, personal de apoyo, gestión de bloqueo de correa, instrumentos de corte de metro, palas y balanza de funcionamiento a batería.
- 2) Retiro de 30 bolsas de almacenamiento de tamaño mediano, desde el laboratorio químico, 10 por cada corte.
- 3) Identificar el número de corte al que corresponde cada bolsa, Figura 44.
- 4) Masado y registro de las masas de las bolsas en la Tabla 46: Tabla para registro de masado de material correspondiente a un primer corte, de anexos.
- 5) Si no es posible el masado de material en una balanza de buena precisión y de posición fija, como la disponible en Mademet, conseguir una superficie estable como una mesa o trozo de madera para poder brindar estabilidad a la balanza a batería y comprobar su nivel.
- 6) Traslado a correa a verificar.
- 7) Solicitar a sala de control un determinado set point y preguntar si la carga está estable en correa a verificar, si la carga está estable se procede a la contrastación.
- 8) Primero se debe determinar la velocidad, para ello se usa un instrumento que mida velocidad y se pose sobre la correa. Otra manera es realizar una serie de marcas sobre la correa con un spray color blanco, determinar la longitud de la correa entre dos puntos, como se muestra en la Figura 46, esta longitud debe ser registrada en la Tabla 43: Tabla para determinación de velocidad de la correa de forma manual de anexos, y a continuación se mide el tiempo que

demoran las marcas blancas de spray, en recorrer los dos puntos anteriormente marcados, Figura 47.

- 9) Medir 10 veces la velocidad, si esta varía notoriamente repetir la medición.
- 10) Luego de la medición de velocidad, se lanzan los testigos, desde una sección anterior al pesómetro, los cuales están separados por segundos determinados en terreno, de modo que cuando pasen por la mesa del pesómetro, permitan tener una medición puntal del flujo másico indicado por el pesómetro.
- 11) El corte número 3 debe corresponder al sitio donde quedó ubicado el primer testigo lanzado, el corte número 2 se debe realizar en el lugar donde quedó el segundo testigo y el primer corte corresponde al sitio donde quedó ubicado el último testigo lanzado. Estos flujos puntuales deben ser registrados en la Tabla 45 de anexos y se debe registrar la hora en que se inicia el lanzamiento de testigo en la Tabla 44: Registro de horas en prueba contrastación pesómetro de los anexos.
- 12) Si la correa tiene oscilaciones en la forma de carga del material los testigos deben ser introducidos en un valle, en un peak y en el medio de un valle y peak de modo que los cortes sean entre dos valles, entre dos peaks y entre un peak y un valle.
- 13) Cuando el tercer testigo pase el pesómetro y se sitúe en un lugar adecuado para realizar el corte, se detiene la correa con el cordón de emergencia y se pide el bloqueo de la correa a verificar (operaciones se debe comunicar con el eléctrico a cargo para solicitar bloqueo), Figura 48.
- 14) Se debe registrar hora de detención de la correa, inicio de corte de correa y hora de término de la actividad, como se indica en Tabla 44.
- 15) Medir 50 cm hacia la izquierda y hacia la derecha del testigo de modo de introducir los bordes del instrumento de corte de metro en estos puntos. El metro se golpea para que logre cortar el material, con la ayuda de martillos o rastrillos, Figura 49.
- 16) Cortar tres metros de correa simultáneamente para optimizar el tiempo de detención, Figura 52.
- 17) Se separa el material de alrededor del metro con palas y luego se retira el corte de metro, Figura 50.
- 18) El material del metro de muestra, se almacena cuidadosamente, en bolsas ya masadas, en orden de numeración de bolsas, con la ayuda de palas, Figura 51.
- 19) Se masa el material más las bolsas en la balanza de Mademet o en la balanza en terreno y se registra en como indica la Tabla 46 de anexos.
- 20) Cuando se termine de masar el material más las bolsas del primer corte avisar a quien registre el peso, que se procederá a masar el material del segundo corte.



Contar con este protocolo es de suma relevancia pues por primera vez se documenta un procedimiento para contrastar pesómetros.



Figura 44: Diez bolsas numeradas para cada corte de metro.



Figura 46: Medición de una longitud determinada en la correa para el cálculo de velocidad.



Figura 45: Instrumentos para corte de metro.



Figura 47: Marca de sitio de inicio de tiempo en cálculo de velocidad.





*Figura 48: Uso candados de bloqueo.*



*Figura 50: Separación de material de corte de metro.*



*Figura 49: Introducción de instrumento de corte de metro.*



*Figura 51: Traspaso de material de correa a bolsas.*



*Figura 52: Tres cortes de metro simultáneamente en una correa.*

Los anteriores procedimientos de contrastación en flujómetro, densímetro y pesómetros incluyendo el paso a paso en terreno fueron llevados a la forma de documentos de protocolos de contrastación y aprobados por el área de ingeniería de procesos.

### 3.2. Acumuladores

En esta sección se explican las metodologías y suposiciones utilizadas para la creación de modelos de cálculo de material acumulado en silos y agitadores, su implementación en Visual Basic o VBA y uso de estas a través Excel ®. Para el caso de silo se manifiesta la separación hecha en niveles para poder llevar cabo el modelo. Se presenta además la fórmula para cálculo de inventario en espesadores, los requerimientos de su implementación en planta y la solución comercial de Column Test.

La importancia de contar con la masa acumulada es que estas son consideradas como corrientes dentro de un balance másico reconciliado y son necesarias para cumplir con la conservación de masa en el balance. Además de los beneficios operacionales que fueron mencionados en 2.4.4. Estado de cálculos de masa acumulada.

#### 3.2.1. Silos

Dentro de los 4 silos de Planta de Pellets, el silo número 1, quien alimenta al molino 1, cuenta con un sensor de altura que puede medir minuto a minuto las variaciones de altura. A partir de esta información se genera un modelo en el que silo es dividido en tres partes de igual altura y cada uno de estos intervalos de altura le corresponde una densidad de material según el nivel de llenado inicial y final.

Sea  $H$  la altura máxima de llenado, es decir llenado al 100%, cada intervalo dentro del silo queda limitado por las alturas de la siguiente tabla

*Tabla 2: División de niveles dentro del silo.*

Nivel	Intervalo de Altura
Tercer	$2H/3 - H$
Segundo	$H/3 - 2H/3$
Primer	$0 - H/3$

Lo que se puede apreciar gráficamente en la Figura 53.

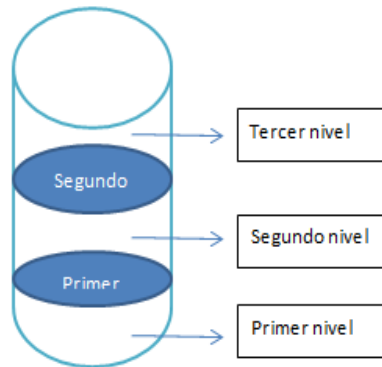


Figura 53: Niveles para silo

Para la construcción del modelo de acumulación, se consideran todas las posibles variaciones que se puede tener entre niveles dentro de un día.

#### CASO 1: Variación en mismo nivel

La densidad usada en el caso en que la variación sea dentro de un mismo nivel es  $\rho$  no compactada, debido a que es el último nivel de llenado, no existe material superior a este que ejerza algún tipo de presión o efecto de compactado.

Los datos del valor de densidad son entregados por el laboratorio Mademet.

Tabla 3: Valor de densidad para llenado en un mismo nivel de silo

Nivel	Intervalo de Altura	$\rho$ Densidad	Valor Densidad [ton/m <sup>3</sup> ]
Primer	0- H/3	$\rho$ no compactada	2.6

Así para el caso en que la variación total ocurre en un mismo nivel, el cálculo de acumulación de masa total durante el día se obtiene según la siguiente ecuación:

$$\Delta M = A * [\rho_{no\ compactada} * (h_{final} - h_{inicial})] \quad (3.9)$$

Donde  $A$  es el área de la base del silo.

Por otro lado, si se quiere conocer la variación más instantánea o la variación durante un periodo de tiempo menor al intervalo diario, se utiliza la fórmula de los trapecios, explicada anteriormente.

En este caso los lados corresponden a las variaciones por minuto de la masa  $dm/dt$  y el espaciado o base de cada trapecio es  $\Delta t$ . Así la fórmula de integral por método de los trapecios finalmente es de la forma;

$$\Delta M = \int_{t_i}^{t_f} \frac{dm}{dt} * dt \approx \sum_{j=t_i}^{j=t_f} \Delta t * \frac{\left( \frac{dm}{dt}_j + \frac{dm}{dt}_{j-1} \right)}{2} \quad (3.10)$$

Donde

$$\frac{dm}{dt}_j = A * \frac{h_j - h_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} * \rho_{no\ compactada} \quad (3.11)$$

$h_j$  es la altura en el instante  $j$ ,  $h_{j-1}$ , es la altura en el minuto anterior,  $A$  el área de la base del silo,  $t_j$  el minuto hasta el cual se ha calculado la acumulación de masa y  $t_{j-1}$  instante anterior.

La variación en el mismo nivel puede ocurrir en los tres niveles en los que se ha dividido el silo. La identificación de cada nivel depende de las alturas iniciales y finales, de este modo se pueden encontrar tres casos de alturas iniciales y finales, las cuales se detallan a continuación;

a) Altura inicial y altura final se ubican en el primer nivel. Figura 54.

$$\begin{aligned} h_i &\leq \frac{H}{3} \\ h_f &\leq \frac{H}{3} \end{aligned} \quad (3.12)$$

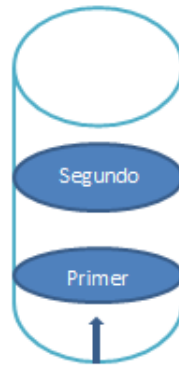


Figura 54: Esquema de llenado en primer nivel de silo

- b) Altura inicial y altura final se ubican en el segundo nivel

$$\begin{aligned}
 h_i &\leq \frac{2 * H}{3} \\
 h_f &\leq \frac{2 * H}{3}
 \end{aligned}
 \tag{3.13}$$

- c) Altura inicial y altura final se ubican en el tercer nivel

$$\begin{aligned}
 h_i &\leq \frac{2 * H}{3} \\
 h_f &\leq \frac{2 * H}{3}
 \end{aligned}
 \tag{3.14}$$

## CASO 2: Llenado en distintos niveles

A medida que el silo se va llenando se va desplazando la altura final alcanzada y se va acumulando material por encima de cada nivel, por lo que van variando las densidades asociadas a estos. Cuando el silo se llena hasta el segundo nivel se deben utilizar dos densidades la semi compactada para el primer nivel y compactada para el segundo, cuando se llena hasta el tercer nivel se deben utilizar las densidades compactada para el primer nivel con mayor presión , semi-compactada para el segundo nivel y no compactada para el último nivel.

- a) Altura inicial en primer nivel y altura final en el tercer nivel

Si la variación diaria pasa desde el primer nivel del silo hasta el tercer nivel, se tiene como condición que;

$$h_i \leq \frac{H}{3}$$

$$\frac{2 * H}{3} \leq h_f \leq H \quad (3.15)$$

Para este caso las densidades a considerar son;

Tabla 4: Niveles y sus valores de densidad para el caso de llenado de silo por más de un nivel.

Nivel	Intervalo de Altura	$\rho$ Densidad	Valor Densidad [ton/m3]
Tercer	2H/3- H	$\rho$ no compactada	2.6
Segundo	H/3- 2H/3	$\rho$ semi-compactada	3.1
Primero	0- H/3	$\rho$ compactada	3.3

El cálculo de masa total acumulada durante el día se obtiene según la siguiente ecuación;

$$\Delta M = A * \left[ \rho_{compactada} * \left( \frac{H}{3} - h_{inicial} \right) + \rho_{semicompactada} * \left( \frac{2 * H}{3} - \frac{H}{3} \right) + \rho_{nocompactada} * \left( h_{final} - \frac{2 * H}{3} \right) \right] \quad (3.16)$$

Las variaciones instantáneas se obtienen a través de la integral de la variación de la masa por el método de los trapecios, ecuación (3.10), con la salvedad que lo distintos  $dm/dt$  están multiplicados por distintos factores de densidad;

Si  $h < H/3$ , entonces;

$$\frac{dm}{dt}_j = A * \frac{h_j - h_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} * \rho_{compactada} \quad (3.17)$$

Si  $H/3 \leq h \leq (2 * H)/3$

$$\frac{dm}{dt}_j = A * \frac{h_j - h_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} * \rho_{semicompactada} \quad (3.18)$$

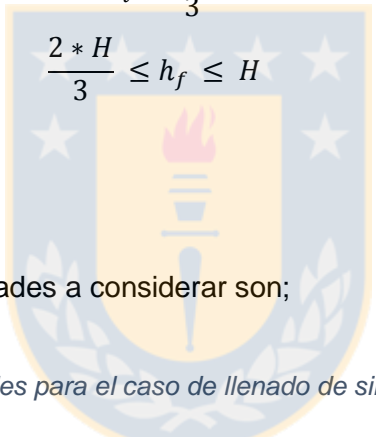
Si  $h > (2 * H)/3$

$$\frac{dm}{dt_j} = A * \frac{h_j - h_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} * \rho_{no\ compactada} \quad (3.19)$$

b) Altura inicial segundo nivel y altura final tercer nivel

Si la variación diaria pasa desde el segundo nivel del silo hasta el tercer nivel, se tiene como condición que;

$$h_i \geq \frac{H}{3}$$

$$\frac{2 * H}{3} \leq h_f \leq H$$


(3.20)

Para este caso las densidades a considerar son;

Tabla 5: Niveles y densidades para el caso de llenado de silo desde segundo a tercer nivel

Nivel	Intervalo de Altura	$\rho$ Densidad	Valor Densidad [ton/m3]
Tercer	2H/3- H	$\rho$ no compactada	2.6
Segundo	H/3- 2H/3	$\rho$ semi-compactada	3.1

El cálculo de masa total acumulada durante el día se obtiene según la siguiente ecuación:

$$\Delta M = A * \left[ \rho_{semicompactada} * \left( \frac{2 * H}{3} - h_{inicial} \right) + \rho_{no\ compactada} * \left( h_f - \frac{2 * H}{3} \right) \right] \quad (3.21)$$

De la misma forma que en el caso a), las variaciones instantáneas se obtienen a través de la integral de la variación de la masa por el método de los trapecios, ecuación (3.10), usando las densidades correspondientes a cada nivel:

Si  $h < (2 * H)/3$ , entonces;

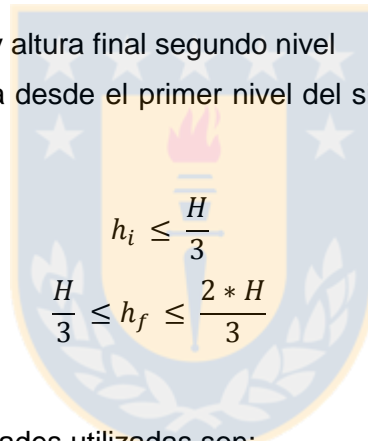
$$\frac{dm}{dt_j} = A * \frac{h_j - h_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} * \rho_{semicompactada} \quad (3.22)$$

Si  $h \geq (2 * H)/3$

$$\frac{dm}{dt_j} = A * \frac{h_j - h_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} * \rho_{no compactada} \quad (3.23)$$

c) Altura inicial primer nivel y altura final segundo nivel

Si la variación diaria pasa desde el primer nivel del silo hasta el segundo nivel, se cumple que:



$$\begin{aligned} h_i &\leq \frac{H}{3} \\ \frac{H}{3} &\leq h_f \leq \frac{2 * H}{3} \end{aligned} \quad (3.24)$$

Para este caso las densidades utilizadas son:

Tabla 6: Niveles y sus densidades para el caso de llenado de silo desde el primer nivel al segundo nivel.

Nivel	Intervalo de Altura	$\rho$ Densidad	Valor Densidad [ton/m3]
Segundo	H/3- 2H/3	$\rho$ no-compactada	2.6
Primer	0-H/3	$\rho$ semi-compactada	3.1

El cálculo de masa total acumulada durante el día se obtiene según la ecuación:

$$\Delta M = A * \left[ \rho_{semicompactada} * \left( \frac{H}{3} - h_{inicial} \right) + \rho_{no compactada} * \left( h_f - \frac{H}{3} \right) \right] \quad (3.25)$$



De la misma forma que en el caso a) y b), las variaciones instantáneas se obtienen a través de la integral de la variación de la masa, ecuación (3.10), usando en este caso las siguientes densidades:

Si  $h < H/3$ , la variación de masa es de la forma:

$$\frac{dm}{dt_j} = A * \frac{h_j - h_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} * \rho_{semicompactada} \quad (3.26)$$

En cambio, si  $h \geq H/3$  :

$$\frac{dm}{dt_j} = A * \frac{h_j - h_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} * \rho_{no compactada} \quad (3.27)$$

### CASO 3: Descarga del silo entre distintos niveles

La densidad en el que caso que el silo vaya descargando pasando por varios niveles, depende del nivel inicial, si el nivel inicial es el tercer nivel entonces se deberán usar las densidades no compactadas, semi-compactada y compactada según e nivel vaya descendiendo. Si el silo pasa del tercer nivel al segundo, sólo se usaran las densidades no compactada para el mayor nivel y semi-compactada para el siguiente. Cuando pase del segundo a primer nivel, el segundo nivel tendrá densidad no compactada y el primer nivel densidad semi-compactada.

La descarga del silo se trabaja como un ítem aparte del llenado en distintos niveles pues las condiciones iniciales de altura son diferentes.

- a) Altura inicial en el tercer nivel y altura final en el primer nivel

En este caso se debe cumplir la siguiente condición de alturas:

$$\frac{2 * H}{3} \leq h_i \leq H$$

$$h_f \leq \frac{H}{3} \quad (3.28)$$

Las densidades utilizadas están distribuidas de la misma forma que en el caso 2 a), donde el silo se llena, ver Tabla 4.

El cálculo del delta de masa total acumulada durante el día es:

$$\Delta M = -1 * A * \left[ \rho_{compactada} * \left( \frac{H}{3} - h_f \right) + \rho_{semicompactada} * \left( \frac{2 * H}{3} - \frac{H}{3} \right) + \rho_{nocompactada} * \left( h_i - \frac{2 * H}{3} \right) \right] \quad (3.29)$$

La integral para la obtención instantánea de masa acumulada es la (3.10) y los  $dm/dt$  son los mismos que caso de llenado del primer al tercer nivel, eso es, para alturas menores a  $H/3$ , la densidad a utilizar es compactada, para alturas entre  $H/3$  y  $(2*H)/3$  la densidad usada es semi-compactada y para alturas mayores a  $(2*H)/3$ , la densidad a utilizar en el término  $dm/dt$  es no compactada.

- b) Altura inicial en tercer nivel y altura final en el segundo nivel  
Las alturas iniciales y finales de este intervalo cumplen que:

$$\frac{2 * H}{3} \leq h_i \leq H$$

$$h_f \leq \frac{2 * H}{3} \quad (3.30)$$

Las densidades involucradas en este caso se ordenan de la misma manera que en el caso 2 b), Tabla 5.

La masa total acumulada durante el día es;

$$\Delta M = -1 * A * \left[ \rho_{semicompactada} * \left( \frac{2 * H}{3} - h_{final} \right) + \rho_{nocompactada} * \left( h_i - \frac{2 * H}{3} \right) \right] \quad (3.31)$$

Para la cantidad de masa acumulada instantánea se utiliza la fórmula (3.10) donde los  $dm/dt$  utilizan las densidades asignadas en el caso 2 b) esto es; para alturas menores a  $(2*H)/3$  la densidad a utilizar es semi-compactada, para densidades iguales y mayores a esa altura la densidad deberá ser del valor no compactada.

c) Altura inicial en el segundo nivel y altura final en el primer nivel

Si la variación de altura es desde el segundo nivel al primer nivel se tiene como condición que:

$$\begin{aligned} \frac{H}{3} \leq h_i \leq \frac{2 * H}{3} \\ \frac{2 * H}{3} \leq h_f \leq \frac{H}{3} \end{aligned} \quad (3.32)$$

Las densidades se asignan de igual forma que en el caso 2,c), Tabla 6, en el que el silo se llena desde primer hasta algún punto del segundo nivel.

El delta de masa acumulado diario es de la forma;

$$\Delta M = -1 * A * \left[ \rho_{no\ compactada} \left( h_i - \frac{H}{3} \right) + \rho_{semicompactada} \left( \frac{H}{3} - h_f \right) \right] \quad (3.33)$$

Para la obtención instantánea de masa acumula se sigue usando (3.10) con la salvedad que los  $dm/dt$  están multiplicados por la misma densidad que en el caso 2,c), esto es; para alturas menores a  $H/3$  se debe utilizar el valor de densidad semi-compactada para el rango de alturas entre iguales o mayores  $H/3$  y menores o iguales a  $(2*H)/3$ , se debe usar densidad no compactada.

Todos los casos en que se puede llenar o descargar el silo, junto con sus condiciones son traspasados a Visual Basic de Excel ® generándose una planilla que en su primera hoja transforma los datos de nivel a metros. En su segunda hoja contiene datos de prueba para verificar el correcto funcionamiento de la planilla y en la tercera hoja denominada "Cálculo de acumulación" se realiza el cálculo de acumulación diaria e instantánea de cada caso a través de un botón en la parte superior y además puede hacer la transformación de nivel a metro directamente sin la necesidad de utilizar la primer hoja, esto se muestra en las figuras 55, 56 y 57.

Ingresar equivalencia en metros del 100% del sensor y dimensiones del silo.

Ingresar valores de densidad compactada, semi-compactada y no compactada.

The screenshot displays an Excel spreadsheet with the following data tables:

Datos		[m]	n	
Altura silo 1	14		a	1439
Diametro silo 1	15.2		rho	181.4583917
Area	181.4583917		rho_semicomp	2.6
100% nivel de llenado	13.6		rho_compactada	3.1

The VBA code editor shows the following script:

```

If (h_inicial <= (Hm / 3) And h_final <= (Hm / 3)) Then

    Delta = a * rho_nocompactada * ((h_final) - (h_inicial))
    Cells(14, 15) = Delta

    Dim dhdt(86400) As Double

    '----en el for poner la diferencia
    dhdt(1) = 1 * a * rho_nocompactada
    Cells(14, 13) = dhdt(1)

    For i = 2 To (n)
        dhdt(i) = ((h(i) - h(i - 1)) / (t(i) - t(i - 1))) * a * rho_nocompactada
        Cells(i + 13, 13) = dhdt(i)
    Next

    Ma = 0
  
```

Figura 55: Script e indicación de ingreso de datos de conversión y densidades para cálculo de acumulación de masa en silos.

Apretar botón para el cálculo de masa acumulada diaria en silo.

Indicación de resultado de cada caso.

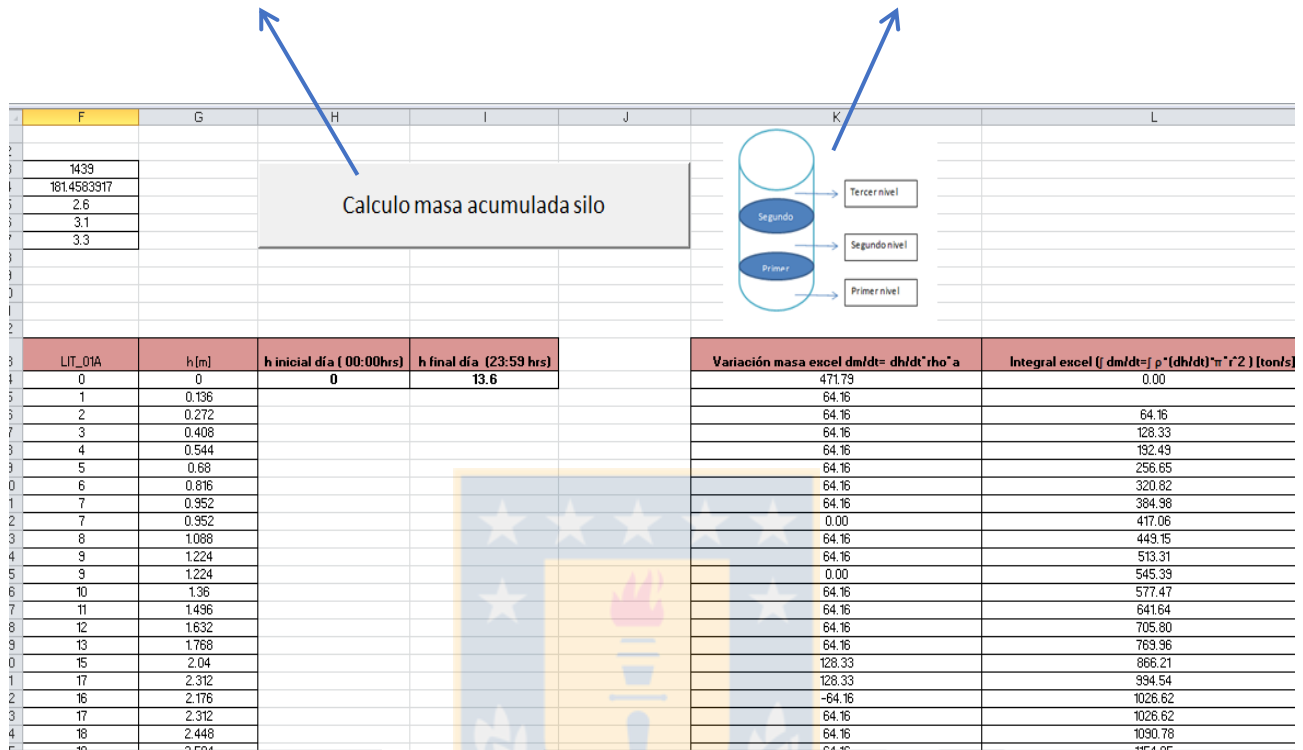


Figura 56: Botón para el cálculo de acumulación de masa en silos y diagrama para la indicación del caso.

Resultado de masa acumulada por minuto.

Resultado de masa acumulada al final del día en silo.

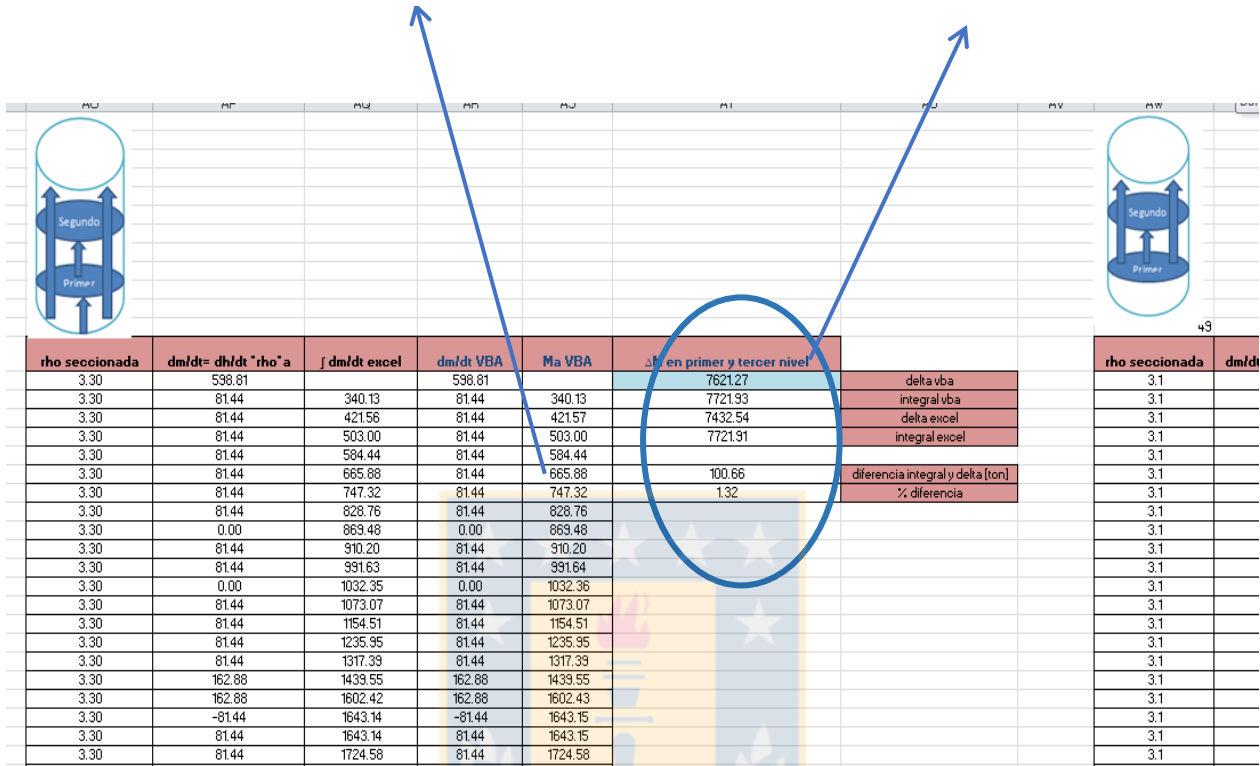


Figura 57: Columna de resultado de acumulación total día e instantánea.

### 3.2.2. Agitadores

En los dos agitadores, en el de material para pellet básico y en el de material para pellet feed, cuentan con un sensor de nivel capaz de medir las variaciones de altura. A partir de la información rescatada del sensor de nivel, minuto a minuto y de la restricción que la descarga del espesador debe ser de 68% de sólidos se puede obtener la masa acumulada en el espesador minuto a minuto y durante todo el día.

Primero se debe obtener la densidad de la pulpa dentro del agitador, usando el porcentaje de sólido en la ecuación:

$$\rho_{pulpa} = \frac{\rho_s * \rho_f}{\rho_s * (1 - X) + \rho_f * X} \quad (3.34)$$

Donde  $\rho_s$  es la densidad de la magnetita 5 [ton/m<sup>3</sup>],  $\rho_f$  es la densidad del agua 1 [ton/m<sup>3</sup>],  $X$  es la fracción de sólido en el agitador 0.68.

Una vez obtenida la densidad de pulpa, se puede realizar el cálculo de masa acumulada total del día según la siguiente ecuación:

$$\Delta M = A * [\rho_{pulpa} * (h_{final} - h_{inicial})] \quad (3.35)$$

Donde  $A$  es el área de la base del agitador,  $\rho_{pulpa}$  la densidad de la pulpa dentro del agitador,  $h_{final}$  la altura al final del día,  $h_{inicial}$  altura al inicio del día.

Para conocer la variación instantánea de masa o durante un periodo de tiempo más acotado se utiliza la ecuación (3.10) donde los  $dm/dt$  ahora son de la forma:

$$\frac{dm}{dt}_j = A * \frac{h_j - h_{j-1}}{t_j - t_{j-1}} * \rho_{pulpa} \quad (3.36)$$

En (3.36)  $h_j$  es la altura en el instante  $j$ ,  $h_{j-1}$ , es la altura en el minuto anterior,  $A$  el área de la base del agitador,  $t_j$  el minuto hasta el cual se ha calculado la acumulación de masa y  $t_{j-1}$  instante anterior.

Al igual que en el caso de acumulación de masa en silos, el cálculo de masa acumulada en los agitadores se realiza con la ayuda de la herramienta Visual Basic de Excel®, creándose la planilla “Cálculo acumulación agitadores”. En esta planilla primero se deben ingresar los datos de dimensión del agitador como; diámetro del agitador y la correspondencia en metros del 100% de llenado, y luego se deben ingresar los datos de densidad de sólido, fluido y fracción de sólido de la pulpa dentro del agitador, tal como se indica en las figuras siguientes:

Ingresar equivalencia en metros del 100% de llenado y dimensiones del agitador.

Ingresar densidad de sólido, fluido y fracción de sólido dentro del agitador.

Datos	[m]			psólido [ton/m3]	5
m (total datos de altura)	1499			pfluido [ton/m3]	1
Altura Max Agitador 1 (100%)	12.2			p pulpa Ag 1 [ton/m3]	2.19
Diámetro Agitador 1	15.9			Fracción de sólido en agitador	0.68
Area	198.56				
1% nivel de llenado					
Acumulación diseño					

Figura 58: Indicación de columnas para ingreso de datos de equivalencia de porcentaje de llenado a metros, dimensiones del agitador, densidades y fracción de sólidos de la pulpa.

Ingresar los datos de nivel extraídos del sensor.

Agitador 1				
Minutos de integración	Sensor de nivel	h [m]	h inicial día ( 00:00hrs)	h final día (23:59 hrs)
1	100	12.2	12.2	6.1
2	99	12.078		
3	99.8	12.1756		
4	99.78	12.17316		
5	99.76	12.17072		
6	99.74	12.16828		
7	99.72	12.16584		
8	99.7	12.1634		
9	99.68	12.16096		
10	99.66	12.15852		
11	99.64	12.15608		
12	99.62	12.15364		
13	99.6	12.1512		
14	99.58	12.14876		
15	99.56	12.14632		
16	99.54	12.14388		
17	99.52	12.14144		
18	99.5	12.139		

Figura 59: Indicación de columna para el ingreso de datos de nivel extraídos desde el sensor de altura del agitador.



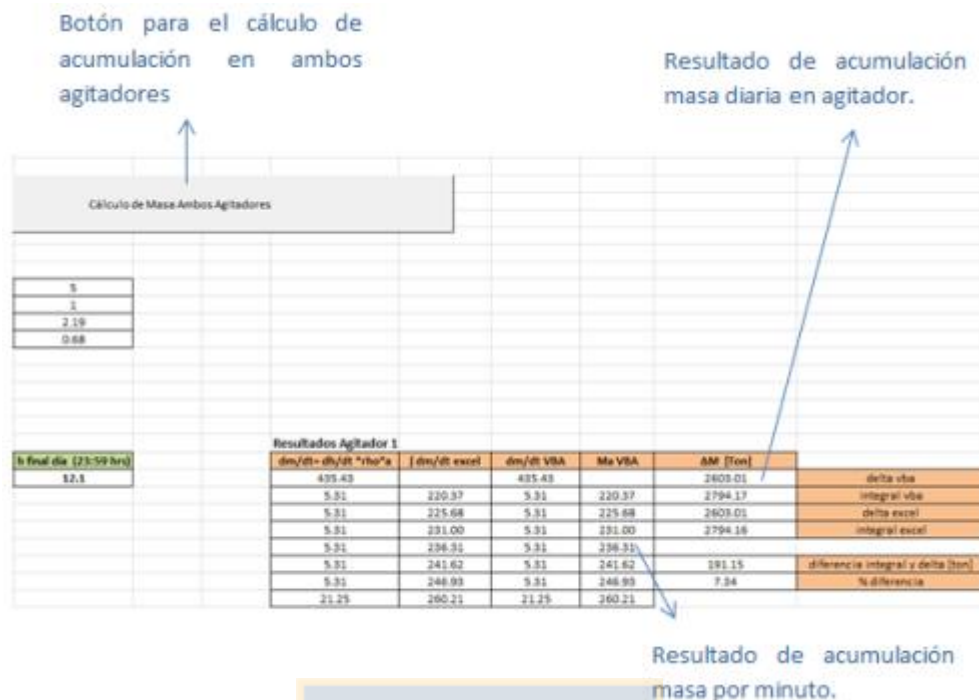


Figura 60: Indicación de la ubicación de columna de resultados de masa acumulada en agitador diaria e instantánea.

### 3.2.3. Espesadores

En Concha, F. (2001). Manual de filtración & separación [19] se encuentra una ecuación para el cálculo de inventario dentro de un espesador, esto es, el tonelaje de sólido almacenado en su interior el cual consiste, en una primera parte, en el tonelaje de sólido de la suspensión de concentración conjugada, (concentración obtenida al diluir la pulpa alimentada cuando se pone en contacto con el agua de la superficie del espesador) y al tonelaje del sedimento de concentración variable entre concentración crítica y concentración de descarga.

$$M_E = \int_0^L \Delta\rho * g * S * \phi(z) * dz = \Delta\rho * g * S * \left[ (L - z_c) * \phi_L + \int_0^{z_c} \phi(z) * dz \right] \quad (3.37)$$

Donde

$\Delta\rho$  es la diferencia de densidades entre sólido y fluido [ $\text{ton}/\text{m}^3$ ],  $g$  la aceleración de gravedad [ $\text{m}/\text{s}^2$ ],  $S$  área superficial del espesador [ $\text{m}^2$ ],  $L$  es la altura del espesador [ $\text{m}$ ],  $z_c$  altura crítica [ $\text{m}$ ],  $\phi(z)$  es la fracción volumétrica de sólido en cada altura  $z$ ,  $\phi_L$  es la concentración conjugada.

La ecuación para la obtención de inventario implica una medida de concentración de sólidos dentro de la zona de consolidación. Sin embargo, la planta no cuenta con instrumento que mida el perfil

de concentración dentro del espesador, no obstante en el mercado se encuentra el equipo Column-test, el cual calcula la presión de poros, el perfil de concentración y entrega el inventario de sólidos dentro del espesador, en línea.

En las figuras 61 y 62 se muestra un bosquejo del funcionamiento del Column-test en planta y en las figuras 63 y 64 los resultados que este equipo entregaría, destacándose la obtención del inventario en la figura 63.

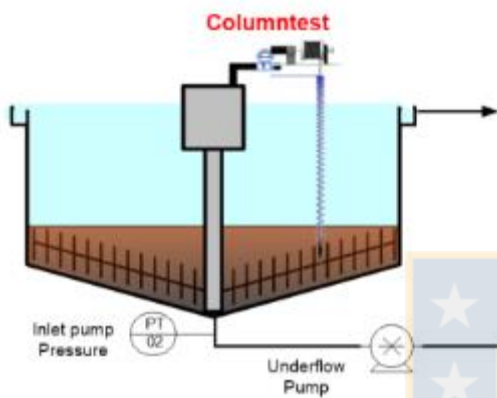


Figura 61: Diagrama funcionamiento Column Test.  
[20].

Figura 62: Ejemplo funcionamiento Column Test  
en planta. [20].

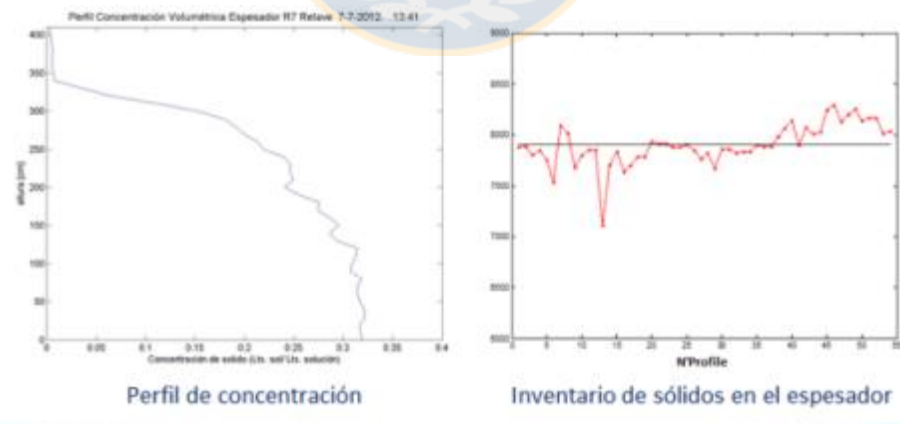


Figura 63: Pantalla de resultados de perfil de concentración e inventario Column Test. [20].



Figura 64: Pantalla de resultados Column Test. [20].

### 3.3. Sensibilización del densímetro por densidad de sólido

Según lo explicado en el ítem 2.5. Antecedentes de calibración del densímetro de colas Es importante conocer si el resultado del densímetro es sensible al cambio de densidad de sólido esto porque un cambio en la densidad de sólido podría afectar al resultado de las contrastaciones y su nivel de confianza dentro de un esquema de balance por reconciliación de datos.

En esta sección se explica la metodología usada para analizar cómo se comporta o traslada la curva de porcentaje de sólido, al usar distintas densidades de sólidos.

Para esto se utiliza el porcentaje de sólido entregado por el densímetro, un GER (gravedad específica relativa) de 3 y una densidad de fluido de 1 [ton/m<sup>3</sup>], los que son introducidos en la ecuación (3.38) con la que se obtiene una densidad de pulpa, que luego se utiliza para recalcular el porcentaje de sólido a otras densidades de sólido o GER, con la ecuación (3.39).

$$\rho_p = \frac{\rho_s * \rho_f}{\rho_s * (1 - x) + \rho_f * x} \quad (3.38)$$

$$x = \frac{\rho_s * (\rho_p - \rho_f)}{\rho_p * (\rho_s - \rho_f)} \quad (3.39)$$

## 4. Resultados y Discusiones

### 4.1. Resultados Contrastación

A continuación se presenta los resultados de las contrastaciones a los instrumentos flujómetro de cola, densímetro de colas y pesómetros. Se analiza si la diferencia entre los datos del instrumento y la prueba de contrastación es estadísticamente significativa a través de las prueba de hipótesis de comparación de dos muestras, se escoge esta metodología y no las pruebas no paramétricas puesto que se quiere privilegiar el uso de la media como método de comparación ya que en el caso particular de los pesómetros que están a continuación de las correas bajo silo llevan una carga oscilante, por lo que un corte se realiza entre dos valles, luego entre un valle y un pico, y finalmente entre dos picos, obteniéndose así solo tres muestras. Si se usara solo el valor central, solo se consideraría el corte número dos, se correría el riesgo de considerar un valor que pudo haber sido tomado de forma incorrecta y el coeficiente de variación de la media aumentaría. Esto, sumado a que en Quality Collage. (2018) en Técnicas de caracterización estadística de procesos con Minitab: Test de Hipótesis e Intervalos de Confianza [12], una afirmación estadística acerca de la media de la población es robusta para datos que no se distribuyen normalmente.

#### 4.1.1. Resultados Flujómetro de Colas

Bajo la consideración de área del estanque como 15.034 [m<sup>2</sup>] y que un nivel de 1% de llenado de sensor corresponde a 0.0365 [m], dato entregado por planta y mostrados en la tabla siguiente, se procedió a la comparación del flujómetro de descarga de relave FIT 798.

*Tabla 7: Datos de estanque y sensor de nivel utilizados en la contrastación de flujómetro de colas*

<b>1%</b>	<b>0.0365</b>
<b>A [m<sup>2</sup>]</b>	<b>15.034</b>

El resumen de los resultados obtenidos en esta contrastación se muestra en la tabla siguiente y son detallados a continuación de esta.

Tabla 8: Resumen resultados contrastación flujómetro de relaves FIT 798

Método	Sensor	Flujómetro
Tipo de Distribución Volumen	Weibull	Normal
Límite inferior 90% de los datos	7553.32	518.00
Límite superior del 90% de los datos	24911.24	19856
Pendiente [L/s]	57.60	59.62
Diferencia entre pendientes [L/s]	-2.02	
Porcentaje de diferencia entre pendientes respecto al sensor	-3.51	
Media Caudal Minitab [L/s]	57.42	59.69
Diferencia entre medias [L/s]	-2.27	
Porcentaje de diferencia entre medias respecto a cada método	-3.95	-3.80
Prueba de hipótesis	<b>P= 0.767</b> No se rechaza	

Al realizar la comparación entre el volumen alcanzado en el estanque a través de las medidas de altura del sensor y el volumen equivalente del flujómetro se tiene una diferencia entre las pendientes del ajuste de los volúmenes a una curva, Figura 65, de 2.02, lo que representa un 3.51% respecto de la pendiente de flujo indicado en la curva del sensor. En otras palabras el flujómetro marcaría 2.02 [L/s] más que lo indicado por el sensor, según el presente análisis. Sin embargo al ser esta diferencia proveniente de un ajuste a una curva, no es tan precisa y tampoco indica si esta diferencia es estadísticamente significativa por lo que se recurre a una prueba de hipótesis de comparación de medias en el programa Minitab®.

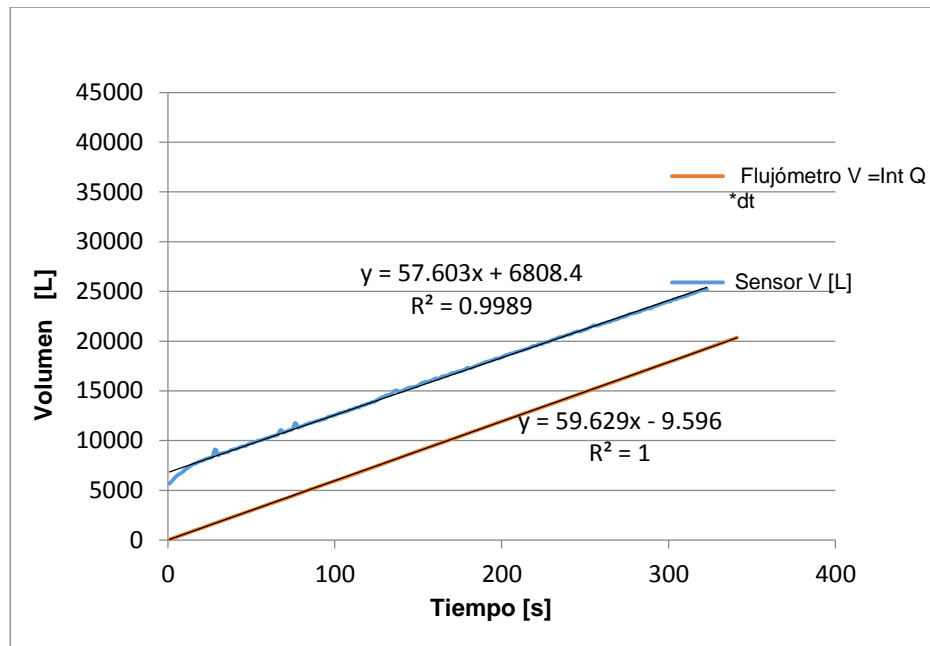


Figura 65: Ajuste a una recta de los datos de aumento de volumen para los métodos de obtención de caudal a través del sensor de altura y a través del flujómetro.

Minitab ® detecta en el método de contrastación a través del sensor, un flujo medio de 57.42 [L/s] y en el historial del flujómetro un flujo medio de 59.69 [L/s], por lo tanto existe una diferencia entre medias del flujo entregado por el flujómetro y el flujo equivalente calculado a través del sensor de 2.27 [L/s] lo que representa 3.95% con respecto a la media entregada por el método de contrastación, usando el sensor, esto es; el flujómetro marca 2.27 [L/s] más que el método con el que se contrastó. Esta diferencia además simboliza 3.8% de la media del flujómetro.

Específicamente, en la prueba de hipótesis de igualdad de medias para valores de flujo Q [L/s] con Minitab ®, se tiene un  $P = 0.767 > 0.05$  por lo que no se rechaza la hipótesis nula a nivel de  $\alpha = 0.05$ . Esto es; al repetir la prueba, se observará este resultado el 77% de las veces, lo que en la práctica significa que no se tiene evidencia que exista una diferencia entre las medias de los métodos por lo que se concluye que la diferencia no es estadísticamente significativa, según los datos con los que se cuenta y se admite una variación de hasta un 3.8% en el flujómetro para seguir teniendo confianza estadística. Esto se puede ver en la descripción siguiente:

### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Q sensor 90%	302	57.42	133	7.6
Q flujom 90%	324	59.69	1.72	0.096

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-2.27	(-17.31; 12.77)

### Prueba

Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor p  
0.767

Figura 66: Prueba de hipótesis de igualdad de medias para contrastación flujómetro de descarga FIT 798.

Se debe tener en consideración que para filtrar el 90% de los datos de flujo Q[L/s] se filtró primero los datos de volumen porque el sensor ubicado en la parte superior del estanque es altamente sensible y en ocasiones la altura medida inmediatamente siguiente era menor a la anterior por lo que se generan deltas de altura negativos arrastrando valores de flujo volumétricos negativos que no son aceptados por Minitab® para la gráfica de probabilidad de distribución, no así los valores de volumen, que al ser volumen acumulado son siempre positivos y son aceptados para el ensayo de probabilidad de distribución de Minitab®, logrando un rango de datos más probables, según el mejor ajuste de distribución, y que dan una indicación del rango de los valores más probables de caudal.

#### 4.1.2. Resultados Densímetro de Colas

Las siguientes tablas detallan los análisis y resultados para cada una de las contrastaciones realizadas al densímetro de descarga de relaves y dos tablas resúmenes finales de estas. Luego de aplicar el protocolo de contrastación de densímetro de cola con las mejoras mencionadas en los capítulos anteriores.

##### 17 de Agosto

Para la primera prueba de contrastación de densímetro realizada el 17 de Agosto, se tiene que la distribución de los datos, tanto del densímetro como de la referencia (datos de laboratorio) poseen una distribución normal, Figura 87, Figura 88, Figura 89 y Figura 90 de anexos y son muestras independientes, Figura 91 de anexos la cual permitiría cumplir los requisitos para aplicar una prueba de t de hipótesis de comparación de medias. Además, no se deben filtrar datos puesto que todos caen dentro del límite de datos del 90% más confiable y probable.

Para esta prueba la media del densímetro arroja 51.56% de sólido, en cambio la media de la prueba de referencia, obtenida por medio de los cortes en el dropbox A y luego filtrados y secados, arroja 48.72% de sólido, presentándose una diferencia de un 2.84% en sólido, es decir, el densímetro estaría indicando 2.84 más en porcentaje de sólido que la prueba de referencia, lo que significa que el densímetro registra un 5.82% más de la media de la prueba de referencia. Estos 2.84 puntos en porcentaje de sólido representan una variación de 5.50 en la media del densímetro que según el resultado de prueba de hipótesis de comparación de medias  $P= 0.01$ , Figura 92, anexos, como se muestra en la Tabla 9, no se puede aceptar y la diferencia entre la prueba de referencia y el densímetro es estadísticamente significativa y es poco probable que se presente esta diferencia bajo el supuesto que ambos métodos están midiendo lo mismo.

Tabla 9: Resultados contrastación densímetro 17 de Agosto

Método	Mademet	Densímetro
Tipo de distribución porcentaje de sólido	Normal	Normal
Límite inferior 90% de los datos	-	-
Límite superior del 90% de los datos	-	-
Media [%]	48.72	51.56
Diferencia [%]	-2.84	
Porcentaje de diferencia respecto a cada método	-5.82	-5.50
Prueba de hipótesis	<b>P =0.011</b> Se Rechaza	



## 24 de Agosto

Para la prueba realizada el 24 de Agosto, los datos de porcentaje de sólido resultados del corte de muestras y análisis en laboratorio Mademet presenta un comportamiento normal. Sin embargo los datos del densímetro podrían tener distribución no normal según el coeficiente de A-D, en la Figura 94 de anexos, pero al realizar la gráfica de probabilidad como distribución normal los datos de densímetro se ajustan aproximadamente a esta teniendo que eliminar los datos que no se encuentran dentro del 90% más probable, Figura 95. Este escaso ajuste a la normalidad de los datos del densímetro podrían ser responsabilidad de la alta cantidad de datos que se tienen en esta prueba pues se extrajeron datos por segundo que agregan mayor variabilidad al análisis.

En este examen, la media del densímetro corresponde a 50.45 en porcentaje de sólido y la de la prueba de referencia, en Mademet, a 47.58 en porcentaje de sólido, siendo otra vez menor, el porcentaje de sólido entregado en la prueba de referencia en 2.87 puntos de porcentaje de sólido. Esta diferencia representa un 6.03% de variación en la media de referencia y un 5.69% de variación en la media del densímetro.

Por otro lado, las muestras no son dependientes como se muestra en la Figura 98, cumpliéndose los prerrequisitos para aplicar la prueba de hipótesis de t de dos muestras, en el que se arroja que  $P=0.0$ , Figura 99, repitiéndose que la diferencia entre medias es estadísticamente significativa.

Lo anterior se resume en la tabla siguiente;

*Tabla 10: Resultados contrastación densímetro 24 de Agosto*

Método	Mademet	Densímetro
<b>Tipo de distribución porcentaje de sólido</b>	Normal	Lognormal-Normal
<b>Límite inferior 90% de los datos</b>	-	49.44
<b>Límite superior del 90% de los datos</b>	-	51.44
<b>Media [%]</b>	47.58	50.45
<b>Diferencia [%]</b>	-2.87	
<b>Porcentaje de diferencia respecto a cada método</b>	-6.03	-5.69
<b>Prueba de hipótesis</b>	<b>P =0.00</b> Se Rechaza	

## 7 de Septiembre

Los datos de porcentaje de sólido entregados por el análisis de laboratorio, para la prueba del 7 de Septiembre se considera que los datos tienen un ajuste de distribución normal, aunque su mejor ajuste no es normal, Figura 103 de anexos, al graficar la probabilidad de distribución normal,

Figura 104 los datos se ajustan bien a esta y ningún dato se escapa de los límites de distribución. Por otro lado los datos extraídos por el densímetro tienen distribución normal, como se muestra en la Figura 101 y Figura 102 de anexos. Además, ambas muestras son independientes, Figura 105 y se puede proceder a aplicar la prueba de t de hipótesis de comparación de dos medias.

El densímetro registra como media 50.21% de sólido, en cambio la prueba de referencia 48.93% de sólido, la diferencia es de 1.28 en porcentaje de sólido y representa 2.62% de variación en la media de la referencia y 2.55 % de variación en la media del densímetro, lo que, aunque pequeño, es suficiente para rechazar la hipótesis de igualdad e indicar que esta diferencia es estadísticamente significativa según el resultado de la prueba t de hipótesis cuyo valor P es 0.0 como se muestra en la Figura 106 y Tabla 11.

*Tabla 11: Resultados contrastación densímetro 7 de Septiembre*

Método	Mademet	Densímetro
<b>Tipo de distribución porcentaje de sólido</b>	Normal-Weibull	Normal
<b>Límite inferior 90% de los datos</b>	-	-
<b>Límite superior del 90% de los datos</b>	-	-
<b>Media [%]</b>	48.93	50.21
<b>Diferencia [%]</b>	-1.28	
<b>Porcentaje de diferencia respecto a cada método</b>	-2.62	-2.55
<b>Prueba de hipótesis</b>	<b>P=0.00</b> Se Rechaza	

## 14 Septiembre

Los datos tanto como del densímetro como los entregados por laboratorio registran un comportamiento normal y no presentan dependencia entre ellos, como se ve en Figura 108, Figura 109, Figura 110, Figura 111, Figura 112 de anexos.

En este caso se filtraron los datos sobre el límite superior de 50.92% para obtener el 90% de los datos más probables en la comparación del densímetro, obteniéndose una media de 50.44% de sólido y 49.38% de sólido en la media de laboratorio, repitiéndose que el densímetro estaría midiendo mayor porcentaje de sólido, difiriendo en esta ocasión en 1.06 puntos en porcentaje de sólido, lo que representa una variación de 2.14 % en la media entregada por Mademet. Tabla 12. Esta diferencia y variación en el densímetro y laboratorio otra vez no se puede aceptar, pues la diferencia es estadísticamente significativa, Figura 113.

Tabla 12: Resultados contrastación densímetro para prueba 14 de Septiembre

Método	Mademet	Densímetro
Tipo de distribución porcentaje de sólido	Normal	Normal
Límite inferior 90% de los datos	-	-
Límite superior del 90% de los datos	-	50.92
Media [%]	49.38	50.44
Diferencia entre medias [%]	-1.06	
Porcentaje de diferencia respecto a cada método	-2.14	-2.09
Prueba de hipótesis	<b>P=0.00</b> Se Rechaza	

### 21 septiembre y 28 de Septiembre

Para las contrastaciones de los días 21 y 28 de Septiembre, ambos métodos, densímetro y laboratorio, resultaron con datos de distribución normal, sin dependencias entre muestras y con todos los datos dentro del 90% más probable por lo que no se eliminaron datos, Figura 115, Figura 116, Figura 117, Figura 118, Figura 119, Figura 122, Figura 123, Figura 124, Figura 125, Figura 126 de anexos. Esto se podría asociar a que los datos extraídos del historial del densímetro están por minuto y no por segundo.

En el día 21 de Septiembre se tuvo una media en el densímetro de 52.05% en sólido mientras que en laboratorio se tuvo 50.52% en sólido, teniendo una diferencia entre ellas de 1.53% en sólido, lo que representa una variación en la media del densímetro de 2.94% y una variación en la media de la prueba de referencia de 3.03%, las cuales representan una variación estadísticamente significativa  $P=0$ , Figura 119 y por lo tanto los datos del densímetro no tendría relación con lo que entrega la referencia. El resultado de la contrastación del día 21 de Septiembre se puede ver en la Tabla 13.

Misma situación se repite para el análisis y contrastación de densímetro del día 28 de Septiembre en que se tuvo una media en el densímetro de 51.39 % en sólido mayor al 50.17% en sólido obtenido por análisis de laboratorio Mademet, la diferencia en esta ocasión entre los métodos corresponde a 1.22 puntos en porcentaje de sólido y a una variación de 2.43% en la media de referencia o un 2.37% en la media de los datos del densímetro, siendo estadísticamente significativa, como se muestra en la Tabla 14 y Figura 127.

Tabla 13: Resultados contrastación densímetro 21 de Septiembre

Método	Mademet	Densímetro
Tipo de distribución porcentaje de sólido	Normal	Normal
Límite inferior 90% de los datos	-	-
Límite superior del 90% de los datos	-	-
Media [%]	50.52	52.05
Diferencia entre medias [%]	-1.53	
Porcentaje de diferencia respecto a cada método	-3.03	-2.94
Prueba de hipótesis	<b>P=0.00</b> Se Rechaza	

Tabla 14: Resultados contrastación densímetro 28 de Septiembre

Método	Mademet	Densímetro
Tipo de distribución porcentaje de sólido	Normal	Normal
Límite inferior 90% de los datos	-	-
Límite superior del 90% de los datos	-	-
Media [%]	50.17	51.39
Diferencia entre medias [%]	-1.22	
Porcentaje de diferencia respecto a cada método	-2.43	-2.37
Prueba de hipótesis	<b>P= 0.00</b> Se Rechaza	

### Resumen de resultados pruebas de contrastación y de hipótesis en densímetro

En las tablas 15 y 16 se presenta el resumen de resultados de las seis contrastaciones realizadas en el densímetro de colas. En la Tabla 15 se presenta la diferencia entre los dos métodos en puntos de porcentaje de sólido, seguido de la variación porcentual que esa diferencia representa en la media de la prueba de referencia, los respectivos resultados de las pruebas t de hipótesis de comparación de medias y sus valores P. En la Tabla 16 además se incluye la variación que la diferencia entre métodos representa en el densímetro, es decir, cuál es el porcentaje de variación que se tiene en el densímetro y que no puede ser aceptado por las pruebas de hipótesis.

En estas tablas, además, se tiene el promedio de la diferencia presentada en las contrastaciones respecto a Mademet, lo que corresponde a 1.80% en sólido, lo que significa una variación promedio de 3.68% en la media de referencia y 3.52% en el densímetro que se debería corregir según resultado de las pruebas de hipótesis, cuyo promedio es de rechazo a valor de  $P=0.0$ .

Tabla 15: Resumen de resultados de prueba de hipótesis en contrastación de densímetro, diferencia de porcentaje de sólido y porcentaje que esta diferencia representa respecto Mademet.

Instrumento	Fecha	Diferencia con respecto a Mademet	% De diferencia	Prueba de Hipótesis	P
<b>Densímetro DIT 798D</b>	17 de Agosto	-2.84	-5.82	Se rechaza	0.01
	24 de Agosto	-2.87	-6.03	Se rechaza	0.00
	07 de Sept.	-1.28	-2.62	Se rechaza	0.00
	14 de Sept.	-1.05	-2.14	Se rechaza	0.00
	21 de Sept.	-1.53	-3.03	Se rechaza	0.00
	28 de Sept.	-1.22	-2.43	Se rechaza	0.00
<b>Promedio</b>		<b>-1.80</b>	<b>-3.68</b>	<b>Se rechaza</b>	<b>0.00</b>

Tabla 16: Resumen de resultados prueba de hipótesis en contrastación de densímetros, diferencia y porcentaje de esta diferencia en datos de Mademet y densímetro

Instrumento	Fecha	Diferencia con respecto a Mademet [% de sólido]	% De diferencia en referencia	% De variación en densímetro	Prueba de Hipótesis	P
<b>Densímetro DIT 798D</b>	17 de Ag.	-2.84	-5.82	-5.50	Se rechaza	0.01
	24 de Ag.	-2.87	-6.03	-5.69	Se rechaza	0.00
	07 de Sept.	-1.28	-2.62	-2.55	Se rechaza	0.00
	14 de Sept.	-1.05	-2.14	-2.09	Se rechaza	0.00
	21 de Sept.	-1.53	-3.03	-2.94	Se rechaza	0.00
	28 de Sept.	-1.22	-2.43	-2.37	Se rechaza	0.00
<b>Promedio</b>		<b>-1.80</b>	<b>-3.68</b>	<b>-3.52</b>	<b>Se rechaza</b>	<b>0.00</b>

#### 4.1.3. Resultados Pesómetros

A continuación se muestran los análisis y resultados para las contrastaciones realizadas en los pesómetros de alimentación a molinos, pesómetro de preconcentrado de alimentación a silos y pellet producto, luego de aplicar el protocolo de contrastación de pesómetro que fue por primera vez documentado para el desarrollo de la presente memoria de título.

#### **4.1.3.1. Resultados de contrastación en pesómetro de alimentación de preconcentrado a Molinos**

Se detallan los resultados de las contrastaciones de los pesómetros ubicados en las correas de alimentación a molinos, para pesómetro de alimentación de preconcentrado molino 4 y 3.

##### **4.1.3.1.1. Resultados de análisis y contrastación en pesómetro de alimentación de preconcentrado a Molino 4**

En las figuras 67, 68 y 69 de más adelante, se puede apreciar visualmente el comportamiento de los cortes y la diferencia entre la media del pesómetro y la media de los cortes de referencia. En la Figura 67 correspondiente a la prueba del 16 de Noviembre se tiene un corte bajo la media del pesómetro, un segundo corte más cercano a la media del pesómetro y el tercero por sobre la media del pesómetro, esto porque a pesar de que en el molino 4 la carga es más pareja, se presentan pequeñas ondulaciones y el primer corte correspondería a un corte entre dos peaks, de estas pequeñas ondulaciones, es decir se retira material de un valle, el segundo corte es entre un valle y un peak y el tercero entre 2 valles, es decir un peak. Por lo que el promedio de la referencia está bajo la media del pesómetro.

En la prueba del 28 de Noviembre, Figura 68 de más adelante, se tiene dos cortes cercanos a la media del pesómetro y uno más alejado, esto es, un corte entre dos valles, es decir en un peak, un corte entre un peak y un valle y un último corte entre dos peaks. Sin embargo todos son menores a la media del pesómetro y por lo tanto la media de la referencia es menor.

Para la contrastación del día 29 de Noviembre, Figura 69, se repite que la media del pesómetro es mayor a los cortes de la prueba de referencia pero se tiene un corte más cercano a la media del pesómetro y dos más lejanos a esta, esto es un primer corte entre dos valles, el segundo entre un valle y un peak y el tercero entre dos peaks.

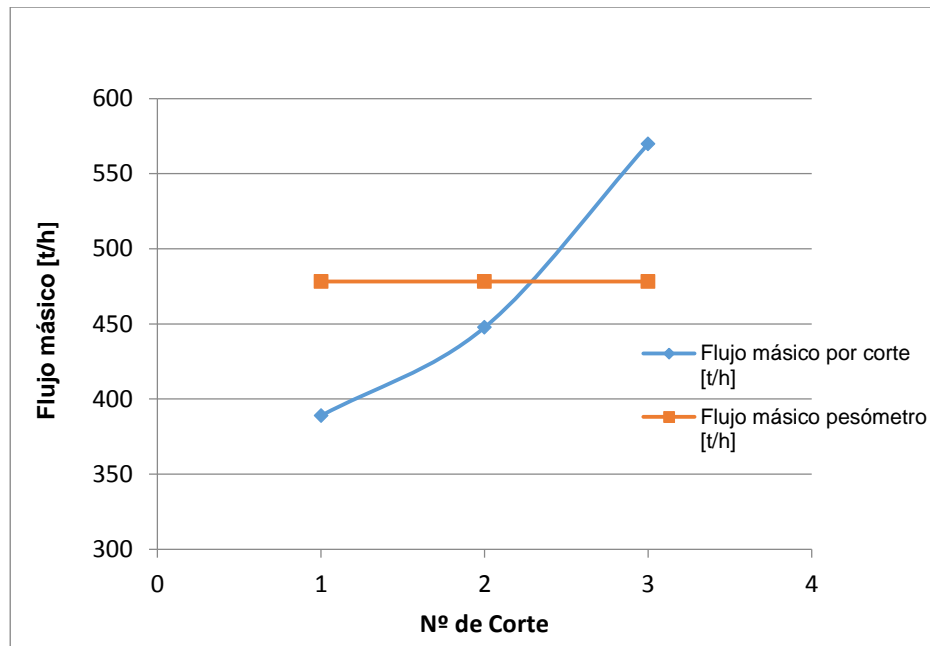


Figura 67: Gráfica de variación de flujo másico en cada corte y comparación con la media de flujo másico obtenido al elegir el noventa por ciento de los datos más probables en el pesómetro para contrastación del 16 de Noviembre.

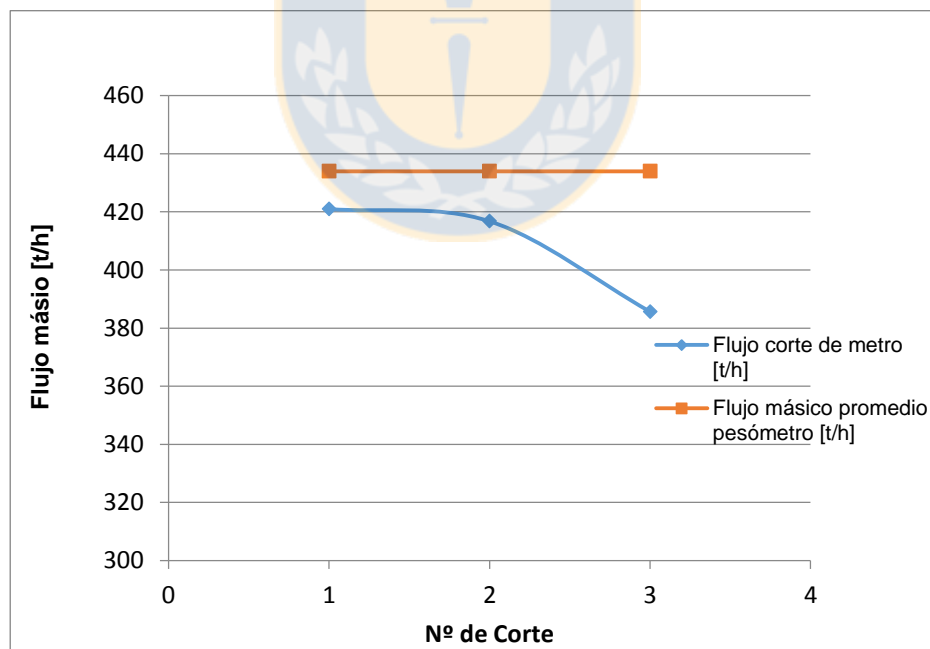


Figura 68: Gráfica de variación de flujo másico en cada corte y comparación con la media de flujo másico obtenido al elegir el noventa por ciento de los datos más probables para el día 28 de Noviembre.

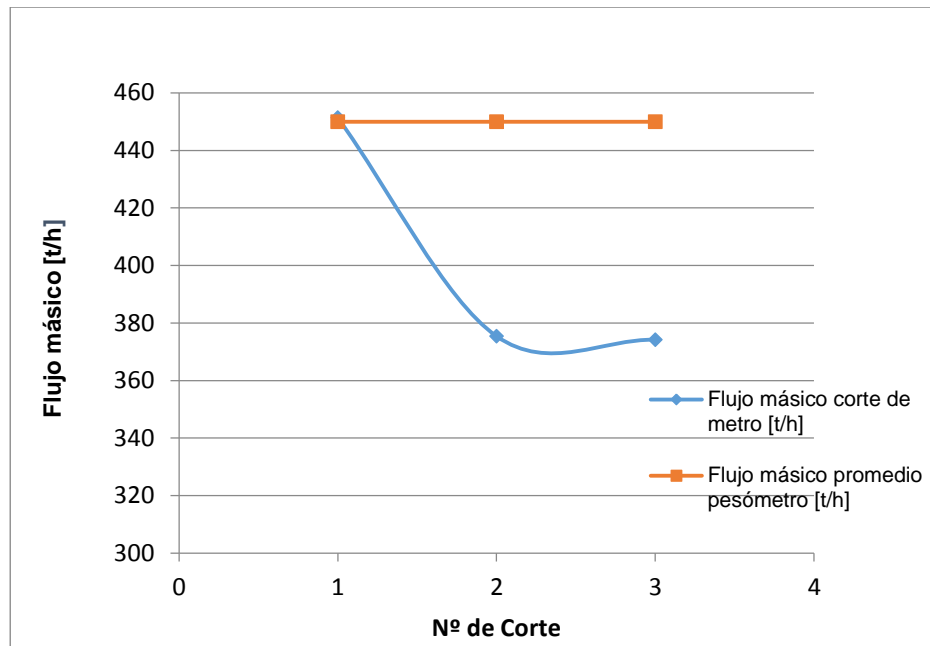


Figura 69: Gráfica de variación de flujo másico en cada corte y comparación con la media de los flujos másicos dentro del noventa por ciento más probable para contratación del 29 de Noviembre.

De las anteriores gráficas se evidencia la importancia de contar con al menos tres datos que reflejen el comportamiento del material en la correa, pues al utilizar la mediana se estaría usando un solo dato correspondiente al dato central, el cual podría haberse cortado no justamente entre la mitad de un peak y un valle, dejando afuera los cortes que representan los peaks y valles de la carga, los cuales ayudan a disminuir ese error. No obstante, a pesar de las diferencias apreciadas en las gráficas de la contrastación a molino 4, se debe analizar si esta diferencia es importante estadísticamente a través de las pruebas de hipótesis. El resultado resumen de este análisis se presenta en la Tabla 17.

Para el 16 de Noviembre se tiene que los tres cortes de prueba caen dentro de los límites de confianza para una distribución normal, Figura 131 y Figura 133. En cambio los datos del pesómetro tienen como mejor ajuste de distribución Weibull, con datos fuera del rango de confianza del 90% más probable, por lo que se deben eliminar los valores bajo 470.14 [t/h] y sobre los 483.29 [t/h]. Además, no existe dependencia entre las muestras. En esta ocasión aunque el mejor ajuste de distribución no es el normal para los datos del historial del pesómetro, se procede a comparar la medias con las pruebas de hipótesis t de dos muestras debido a que se privilegia la comparación de medias, por sobre la mediana, como sería si se usara una prueba de Mann-Whitney y, por otro lado, se privilegia tener una misma prueba y estándar de comparación por igual para todos los instrumentos.



La media de la prueba de referencia para el 16 Noviembre corresponde a 468.75 [t/h], en cambio la media del historial del pesómetro corresponde a 478.24 [t/h], es decir el pesómetro estaría marcando 9.49 [t/h] más que la referencia, lo que significa una variación de 1.99%, esto es, que debería medir 1.99% menos para ajustarse a la referencia. Sin embargo, la prueba de hipótesis arroja un  $P=0.875$ , aprobando que esta diferencia no es estadísticamente significativa y se acepta esta variación, Figura 135. Por otro lado, como análisis extra al realizar la prueba de comparación de medianas de Mann-Whitney arroja un  $P=0.321$  aceptando también la igualdad entre medias y el buen funcionamiento del pesómetro.

El mismo análisis se realiza para las pruebas en pesómetro de molino 4 para los días 28 y 29 de Noviembre, en que los datos de historial de pesómetro y cortes de la prueba se ajustan de mejor forma a una distribución normal, figuras 136 a la 139 y figuras de la 143 a la 146 de anexos para el caso del 29 de Noviembre.

Para el 28 de Noviembre se obtiene una media en la prueba de referencia de 407.79 [t/h] y una media de 433.95 [t/h] para los datos de historial del pesómetro, presentándose una diferencia de 26.16 [t/h], esto es, el pesómetro estaría indicando 26.16 [t/h] más que la referencia, lo que implica una variación de 6.03% en la media del pesómetro, lo que no sería importante pues la prueba de hipótesis arroja otra vez un  $P$  mayor a 0.05, como muestra la segunda columna de la Tabla 17 y la Figura 143.

En la prueba en molino 4 para el 29 de Noviembre se repite que el pesómetro marca más que la referencia en 49.65 [t/h], lo que significa una variación de 11.03% en el pesómetro, la que no es de mayor relevancia puesto que se acepta la prueba de hipótesis de igualdad de medias con los datos que se tiene y un valor de  $P=0.191$ , Figura 149.

En la última columna de la Tabla 17 se encuentra un resumen de las tres contrastaciones realizadas en pesómetro de alimentación a molino 4, en que se tiene una diferencia promedio de 28.43 [t/h], es decir, el pesómetro estaría indicando más que la referencia en tal cantidad, lo que significa 6.95% en la media de referencia o 6.35% de variación en el pesómetro, pero a pesar de esto se sigue teniendo confianza estadística en los datos arrojados por el pesómetro, pues cada una de las pruebas resultó con un  $P$  mayor a 0.05 y cuyo promedio fue de  $P=0.403$ .

Lo anterior indica que se admite una variación promedio de 6.35% en el pesómetro para seguir teniendo confianza estadística en el pesómetro. Sin embargo, se podrían aceptar desviaciones mayores, puesto que se obtuvo una de las pruebas con una variación de 11.03% respecto a la media del pesómetro y con un  $P=0.191$ , donde se sigue teniendo confianza estadística en el instrumento.

Tabla 17 : Resumen de análisis en pesómetro a Molino 4

Fecha	16-nov	28-nov	29-nov	Promedio
Promedio flujo másico en cortes de metro [t/h]	468.75	407.79	400.32	
Tipo de distribución corte	Normal	Normal	Normal	
Tipo de Distribución pesómetro	Weibull	Normal	Normal	
Límite inferior 90% de los datos	470.14	429.58	445.73	
Límite superior del 90% de los datos	483.29	438.11	454.22	
Flujo másico historian [t/h]	478.24	433.95	449.97	
Diferencia en [t/h]	-9.49	-26.16	-49.65	<b>-28.43</b>
% de diferencia en corte de metro	-2.03	-6.41	-12.40	<b>-6.95</b>
% de diferencia en media pesómetro	-1.99	-6.03	-11.03	<b>-6.35</b>
Prueba de hipótesis	P= 0.875 No se Rechaza	P= 0.143 No se Rechaza	P=0.191 No se Rechaza	<b>0.403</b>

#### 4.1.3.1.2. Resultados prueba de contrastación en pesómetro de alimentación de Preconcentrado a Molino 3

En la contrastación de pesómetro de alimentación de preconcentrado a molino 3, al igual que en todas las correas de alimentación a molinos, se tiene un largo restringido por lo que solo se pueden realizar tres cortes de un metro. En este caso el pesómetro está ubicado inclinado, próximo al sector techado de los molinos, situación que imposibilita la toma de datos puntuales a través de un testigo, por lo que se extraen todos los datos por segundo desde las 10 a 10:37 horas del día 5 de Diciembre en el historian del molino 3, los que tienen como mejor ajuste de distribución una distribución log-normal, seguido de una normal, según el coeficiente de Anderson Darling, Figura 151. El escaso ajuste mostrado en la figura se puede deber a la gran cantidad de datos al no poder restringir según valores puntuales de testigo.

La media en el pesómetro para la prueba en molino 3, luego de filtrar los datos al 90% más probables, corresponde a 240.94 [t/h], como se observa en la Figura 70, en la que también se muestra el flujo másico de cada uno de los cortes, siendo el primer corte entre dos valles, el segundo entre un peak y un valle y el tercero entre dos valles. Se nota que el primer corte entre dos valles o un peak es el más cercano a la media del pesómetro y el resto de ellos se distancian más de esta media, por lo tanto, la media de los cortes es menor a la referencia.

La media de los cortes de la prueba de referencia es 227.12 [t/h], valor menor al pesómetro en 13.82 [t/h], lo que significa una variación de 5.73% en la media del pesómetro o 6.19 % en la

media de la prueba de referencia. A pesar de esto se debe analizar si esta diferencia representa una variación importante a nivel estadístico a través de las pruebas de hipótesis t de comparación de medias.

En la Tabla 18 y Figura 156 se pueden apreciar los detalles del análisis de contrastación en molino 3, resultado un valor  $P= 0.111$ , significando que la variación o diferencia entre la prueba y el pesómetro no estadísticamente significativa y se puede confiar en él.

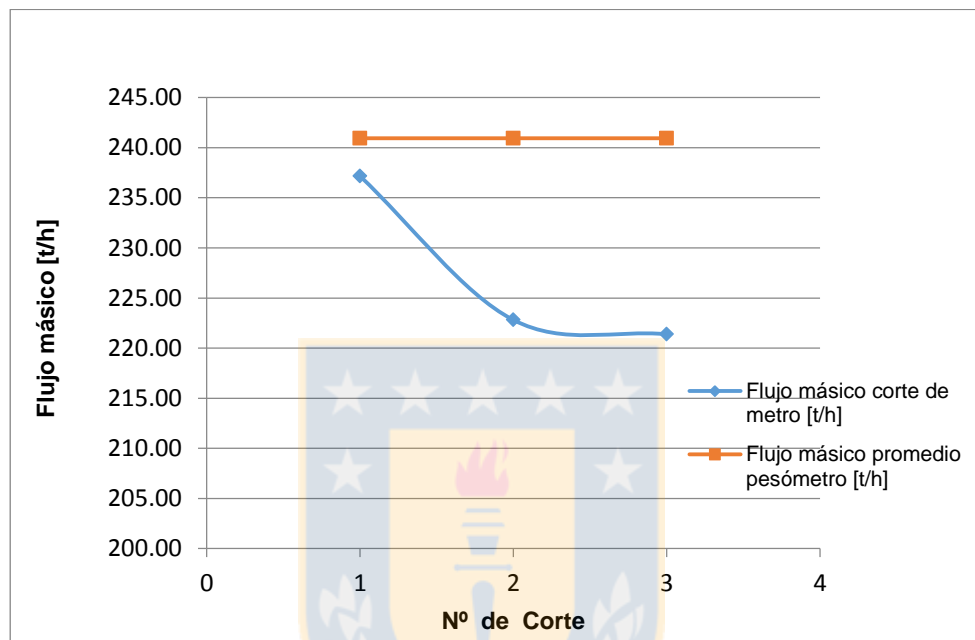


Figura 70: Gráfica de variación de flujo másico en cada corte y comparación con la media obtenida al elegir el noventa por ciento de los datos más probables de flujo másico para contrastación de pesómetro de preconcentrado molino 3.

Tabla 18: Tabla resumen de análisis de contrastación en pesómetro de alimentación a Molino 3

Fecha	05-dic	05-dic	05-dic	Promedio
Flujo másico en cortes de metro [t/h]	237.17	222.82	221.38	227.12
Tipo distribución cortes	Normal			
Tipo de distribución datos pesómetro	Log-Normal			
Límite inferior 90% de los datos	235.68			
Límite superior 90% de los datos	243.76			
Flujo másico historian [t/h]	240.94	240.94	240.94	240.94
Diferencia en [t/h]	-3.77	-18.12	-19.56	<b>-13.82</b>
% de diferencia en corte de metro	-1.59	-8.13	-8.83	<b>-6.19</b>
% de diferencia en pesómetro	-1.56	-7.52	-8.12	<b>-5.73</b>
Prueba de hipótesis	<b>P=0.111</b> No se Rechaza			

#### 4.1.3.2. Resultados Pesómetro Preconcentrado Alimentación a Silos

La contrastación en el pesómetro de alimentación de preconcentrado fue efectuada a través de flujos puntuales, visualizados en la pantalla en terreno del pesómetro, indicados por un testigo, esto porque la carga de este material en la correa era intermitente el día de la contrastación, ya que la correa puede ser cargada a través de pala. Los flujos puntuales tomados de la pantalla son mostrados en color naranja, en la Figura 66, en la que también se encuentran los valores de los cortes realizados en azul. En esta se aprecia una diferencia importante entre ambos métodos, la cual será analizada por prueba de hipótesis.

La Figura 162, de anexos, insinúa una dependencia entre los flujos de los cortes y los flujos puntuales del pesómetro, ya que se trata de una prueba en que se mide el mismo flujo de dos formas diferentes, primero en el pesómetro y luego a través de los cortes, entonces no se puede utilizar la metodología anteriormente usada en los pesómetros, en los que se consideran los datos del pesómetro, durante un cierto periodo de tiempo, ya que en este caso existirán datos con flujo cero que bajarían el promedio de la media.

Los flujos máxicos puntuales tomados desde la pantalla se ajustan bien dentro una distribución normal, Figura 158 y Figura 159. Por otro lado, los datos de flujo máxico de cortes también tienen como mejor ajuste una distribución normal, figuras 159 y 160, lo que permite la comparación por medio de una prueba t de hipótesis. Sin embargo, al tratarse de muestras dependientes se utiliza la herramienta estadística de comparación de medias en muestras pareadas, t pareada, la cual arroja un  $P=0.039$ , Figura 164, esto es, la diferencia promedio de 155.77 [t/h] por la que está el pesómetro sobre la referencia y que representa una variación de 5.19% en el pesómetro, como muestra la Tabla 19, es estadísticamente significativa y no se puede aceptar que las medias sean iguales.

La mayor distancia entre la media del pesómetro y los cortes de la Figura 71 se puede asociar a la dificultad de la prueba para realizar el corte con las cubiertas de la correa puestas, no pudiéndose retirar todo el material correspondiente al corte de metro.

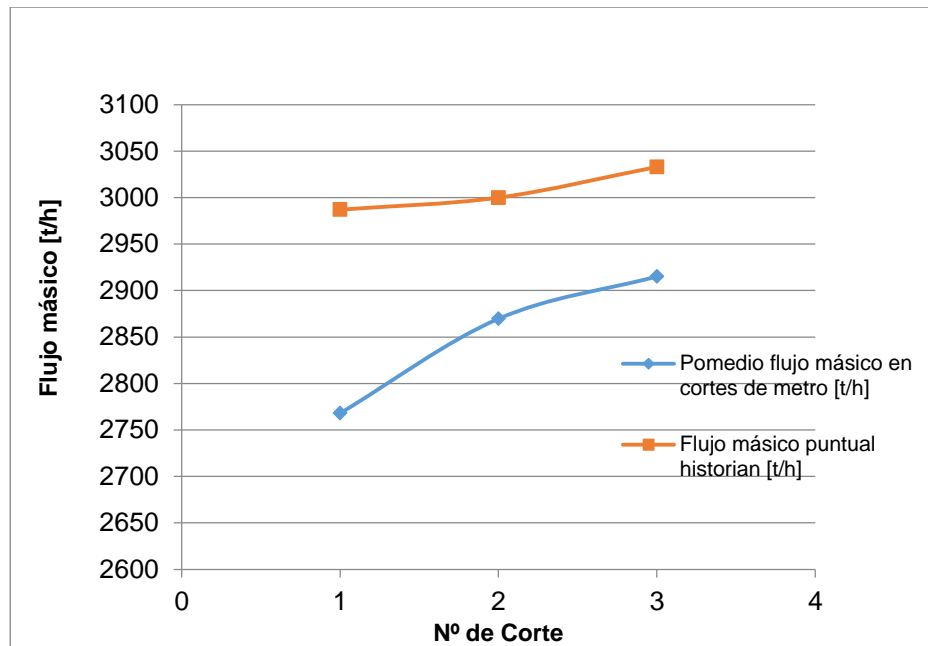


Figura 71: Gráfica variación de flujo másico en cada corte y comparación con su flujo másico puntual para contrastación de pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos.

Tabla 19: Tabla resumen contrastación de pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos

Fecha	10-dic	10-dic	10-dic	Promedio
Flujos másicos en cortes de metro [t/h]	2767.96	2869.63	2915.09	2850.89
Flujo másico puntual historian [t/h]	2987.00	3000.00	3033.00	3006.67
Diferencia en [t/h]	-219.04	-130.37	-117.91	<b>-155.77</b>
% de diferencia en corte de metro	-7.91	-4.54	-4.04	<b>-5.50</b>
% de diferencia en pesómetro	-7.33	-4.35	-3.89	<b>-5.19</b>
Prueba de Hipótesis	<b>P=0.039</b> Se Rechaza			

#### 4.1.3.3. Resultados Pesómetro Pellet Producto

La carga de la correa que lleva el pellet producto no tiene forma ondulatoria y es más bien estable, por lo que no es necesario que los testigos indiquen valles y peaks, pero estos son usados para tener una indicación de flujos puntuales al momento de la contrastación y extraer un rango más acotado de datos. El comportamiento de los valores de flujo másico de los cortes de metro con respecto a la media del pesómetro, del instante de la contrastación, se muestran en la Figura 72, en la que se aprecia visualmente que la media de los cortes se acercaría a la media del pesómetro.

Los flujos máxicos provenientes de los cortes de metro tienen un buen ajuste dentro de la distribución normal, Figura 171. En cambio los datos provenientes del pesómetro, tienen como mejor ajuste de distribución una tipo Weibull, donde, además, se deben eliminar datos para contar con el 90% más probable, entre los rangos indicados en la Tabla 20. A pesar de esto, se utiliza la prueba de hipótesis t para privilegiar la comparación de medias y una misma exigencia estadística para todos los instrumentos.

La prueba de hipótesis t arroja que la diferencia de 4.74 [t/h] por la que el pesómetro mide por sobre los cortes no es estadísticamente significativa con un valor de  $P= 0.310$ , Tabla 20, Figura 173 y que la variación de 1.07% en el pesómetro se acepta con los datos que se tiene, por lo que se sigue confiando en su medición.

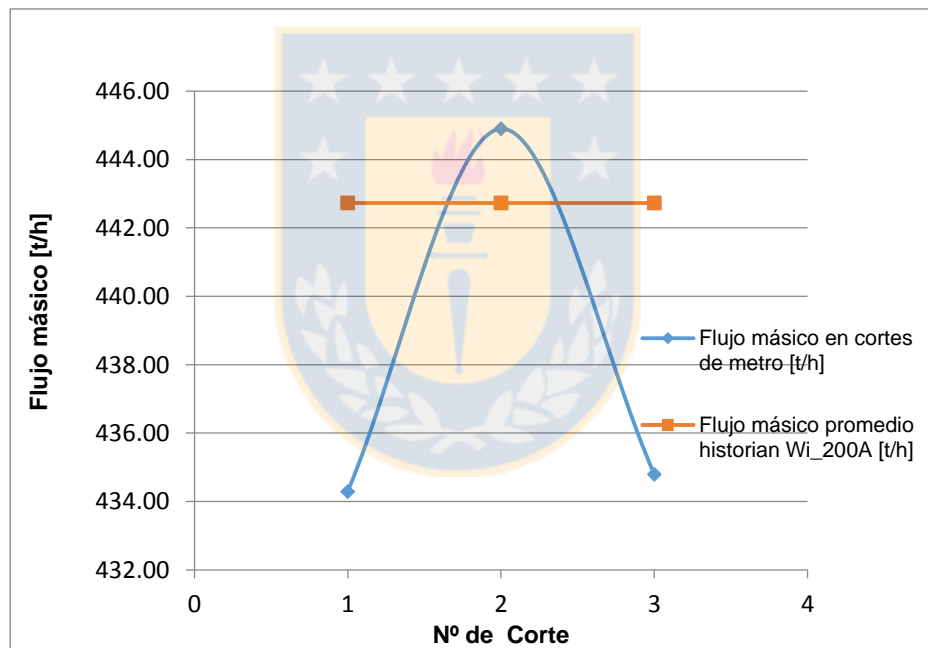


Figura 72: Gráfica variación de flujo másico en cada corte de metro y comparación con la media de los flujos que se encuentran dentro del noventa por ciento más probable para contrastación de pesómetro de pellet producto.

Tabla 20: Tabla resumen análisis de contrastación en pesómetro de pellet producto

Fecha	11-dic	11-dic	11-dic	Promedio
<b>Flujo másico en cortes de metro [t/h]</b>	434.29	444.90	434.79	437.99
<b>Tipo de distribución datos pesómetros</b>	Weibull			
<b>Límite inferior 90% de los datos</b>	419.31			
<b>Límite superior 90% de los datos</b>	459.12			
<b>Flujo másico promedio historial Wi_200A [t/h]</b>	442.73	442.73	442.73	442.73
<b>Diferencia en [t/h]</b>	-8.44	2.17	-7.94	<b>-4.74</b>
<b>% de diferencia en corte de metro</b>	-1.94	0.49	-1.83	<b>-1.09</b>
<b>% de diferencia en pesómetro</b>	-1.91	0.49	-1.79	<b>-1.07</b>
<b>Prueba de hipótesis</b>	<b>P=0.310</b> No se Rechaza			

Solo se realizan tres cortes por prueba debido a dos razones: la extensión de las correas de alimentación de preconcentrado a molinos no es suficiente para realizar más de tres cortes simultáneamente y por otra parte, el personal y tiempo de detención de correas es restringido pues el detener las correas por más tiempo afectaría la producción sobre todo si se trata de correas de alimentación a silos.

Se debe comentar que las contrastaciones a pesómetro de pellet feed no se pudieron llevar a cabo pues no se estuvo produciendo tal producto y por otro lado no se estuvo alimentando los molinos 1 y 2 en el periodo en que se coordinaron las contrastaciones de pesómetro de alimentación a molino.

#### 4.1.4. Resumen resultado instrumentación para prueba de hipótesis t de comparación de medias y orden de confianza asignado

La Tabla 21 resume el resultado de las pruebas de contrastaciones realizadas a los instrumentos pesómetro de molino 4, pesómetro de molino 3, pesómetro de preconcentrado, pesómetro de pellet producto, densímetro de relave y flujómetro de relave, indicando la diferencia por la que estos instrumentos están midiendo por sobre la referencia, variación que esta diferencia significa en el instrumento en cuestión y el resultado de la prueba t de hipótesis.

Como el valor P es una medida de la probabilidad de que se presenten tales diferencias aun cuando ocurre la igualdad de media entre ambos métodos, este es utilizado como indicador del nivel de confianza que se tiene en el instrumento, confianza de la probabilidad que ocurra la

igualdad, donde a un mayor valor de P es más probable que se presente la diferencia y es más probable que la media del instrumento se parezca más a la media real con la que se comparó.

De este modo se puede realizar un ranking del orden de desviación de los instrumentos en el que, el primer lugar se encuentra el densímetro de colas, es decir el instrumento en que menos se confía, seguido del pesómetro de preconcentrado, cuyo  $P=0.039$  no alcanza los 0.05 para no rechazar. El tercer instrumento en orden de desviación es el pesómetro del molino 3, a partir del cual no se pueden rechazar las igualdades de medias, ya que los P comienzan a tener valores mayores a 0.05. A continuación de este, le siguen el pesómetro de pellet producto en el nivel 4 de variación y el pesómetro de molino 4 con el nivel 5. El instrumento en el que más confianza se tiene, es el flujómetro de colas, en orden 6 de desviación a un  $P=0.767$ .

*Tabla 21: Resumen de resultados promedios en pruebas de hipótesis de instrumentos contrastados y orden de confianza*

<b>Pesómetro</b>	<b>Diferencia con respecto a corte [t/h]</b>	<b>% Variación en el instrumento</b>	<b>Prueba de Hipótesis</b>	<b>P</b>	<b>Orden de desviación</b>
<b>Molino 4</b>	-28.43	-6.35	No se rechaza	0.403	5
<b>Molino 3</b>	-13.82	-5.73	No se puede rechazar	0.111	3
<b>Preconcentrado</b>	-155.77	-5.19	Se rechaza	0.039	2
<b>Pellet Producto</b>	-4.74	-1.07	No se puede rechazar	0.319	4

<b>Densímetro</b>	<b>Diferencia con respecto a Mademet</b>	<b>% Variación en el instrumento</b>	<b>Prueba de Hipótesis</b>	<b>P</b>	<b>Orden de desviación</b>
<b>DIT 798D</b>	-1.80	-3.52	Se rechaza	0.00	1

<b>Flujómetro</b>	<b>Diferencia respecto a prueba [L/s]</b>	<b>% Variación en el instrumento</b>	<b>Prueba de Hipótesis</b>	<b>P</b>	<b>Orden de desviación</b>
<b>FIT 798D</b>	-2.27	-3.80	No se rechaza	0.767	6

Una vez obtenido el nivel de confianza de la instrumentación se puede proceder a asignar los factores de peso proporcionales a los valores P. Para el instrumento de mayor  $P=0.767$  se le asigna el mayor factor de peso  $W=1$  y para el instrumento con menor P se le asigna el factor de peso  $W=0.5$ , como se muestra en la Tabla 22. De esta forma los factores de peso con valores intermedios de P quedan determinados proporcionales a su confianza según una ecuación lineal



construida a partir de estos dos puntos extremos. Esta ecuación es  $W(P) = 0.6519 \cdot P + 0.5$ , como se muestra en la Figura 73.

Tabla 22: Factores de peso de extremos

Confianza	Instrumento	P	W(P)
Mayor confianza	Flujómetro	0.767	1
Menor confianza	Densímetro	0	0.5

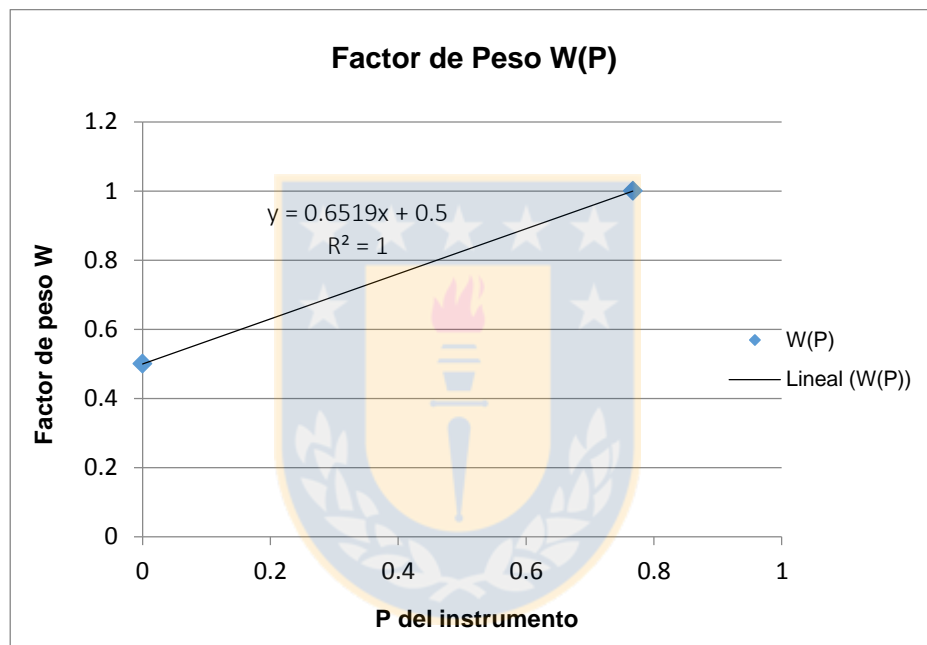


Figura 73: Ecuación para factores de peso de instrumentos contrastados.

De este modo, los factores de peso W para los instrumentos cuyo valor de P se encuentran entre 0.767 y 0 son los de la Tabla 23.

Tabla 23: Factores de peso para esquema de ajuste de balance por reconciliación de datos.

Instrumento	P	W(P)	orden de desviación
Flujómetro	0.767	1.00	6
P. Molino 4	0.403	0.76	5
P. Pellet producto	0.319	0.71	4
P. Molino 3	0.111	0.57	3
P. Preconcentrado	0.039	0.53	2
Densímetro	0.0	0.50	1

Así, en el esquema de balance por reconciliación de datos los valores que tendría un menor ajuste o menor variación del dado por instrumentación son los valores entregados por el flujómetro de colas con  $W=1$ , seguido de los valores entregados por el pesómetro de alimentación a molino 4  $W=0.76$  y los datos de mayor variación son los del densímetro de colas con  $W=0.5$ .

#### 4.1.5. Resumen resultado instrumentación para prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney

El mismo análisis llevado a cabo en la Tabla 21, se muestra en la Tabla 24, usando las pruebas no paramétricas de Mann-Whitney y la prueba pareada de Wilcoxon para el caso del pesómetro de preconcentrado. En la última columna se encuentra el nivel de confianza asignado según estas pruebas y se nota un cambio en el orden de los pesómetros. Esta prueba es realizada solo a modo de comparación ya que, como se ha mencionado anteriormente, en estas pruebas la comparación se hace con respecto a la mediana y el ranking de confianza que se privilegia es el hecho a través de las pruebas t de hipótesis en la Tabla 21.

Tabla 24: Resultados de orden de confianza según pruebas No Paramétricas

Pesómetro	Diferencia con respecto a corte [t/h]	% De Diferencia	Prueba de Hipótesis	P	Orden de desviación
Molino 4	-40.71	-10.24	No se puede rechazar	0.152	4
Molino 3	-17.90	-8.03	Se rechaza	0.003	2
Preconcentrado	-149.42	-5.21	No se puede rechazar	0.181	3
Pellet Producto	-6.54	-1.50	No se rechaza	0.326	5

Densímetro	Diferencia con respecto a Mademet [X%]	% De Diferencia	Prueba de Hipótesis	P	Orden de desviación
DIT 798D	-1.73	-3.52	Se rechaza	0	1

Flujómetro	Diferencia respecto a prueba [L/s]	% De Diferencia	Prueba de Hipótesis	P	Orden de desviación
FIT 798D	-2.04	-3.55	No se rechaza	0.478	6

Según los resultados expuestos en las tablas anteriores para la prueba de hipótesis paramétrica t de dos muestras efectuada sobre los datos del flujómetro se detecta una mayor diferencia entre el instrumento y su referencia, que la prueba no paramétrica de Mann-Whitney, donde se percibe una diferencia de 2.04 [L/s] y variación porcentual de 3.55 %, por lo tanto, detecta también una diferencia porcentual mayor en la prueba t. Sin embargo, la prueba paramétrica entrega un valor de P más fuerte  $P=0.767$  que el  $P=0.478$  de la prueba de Mann-Whitney pero este resultado sigue ubicando al flujómetro en el lugar número 1 de confianza.

Para el caso del densímetro, el resultado del valor de P de las pruebas t de hipótesis se corrobora en las pruebas de Mann-Whitney donde se obtienen mismo valor de  $P=0$  ubicando según esto, al densímetro en el último nivel de confianza.

Para el caso de análisis de medianas a través de las pruebas no paramétricas de Mann-Whitney en pesómetros los resultados son diferentes a las pruebas t de hipótesis, se tiene un valor de  $P=0.152$  en las pruebas de Mann-Whitney para molino 4 en vez de  $P=0.403$  obtenido en las pruebas de hipótesis de comparación de medias ubicando así en las pruebas de Mann-Whitney al pesómetro de molino 4 en el cuarto lugar de desviación en vez del quinto en el que se ubica con las pruebas de comparación de medias. Similares situaciones se presentan para el resto de los pesómetros evaluados en las que el pesómetro de pellet producto, según las pruebas no paramétricas, se ubicaría en un lugar más bajo de desviación, el lugar número 5, en vez del cuarto lugar y los

pesómetros de molino 3 se ubicarían en el lugar número 2 de desviación en vez del 3 y el pesómetro de preconcentrado a silos se ubicaría en el lugar 3, según las pruebas no paramétricas, en vez del lugar número 2 de desviación.

## **4.2. Resultados Cálculos de Acumulación**

Además de la confianza en la instrumentación se debe tener en cuenta en el balance másico las masas que se acumulan y que serán consideradas como corrientes dentro del esquema de ajuste másico, como se mencionó en el ítem 2.4. Antecedentes de equipos acumuladores. Razón por la que se crean modelos para poder obtener la acumulación en silos, agitadores y espesadores de la forma antes mencionada en 3.2. Acumuladores. En esa misma sección se explica el uso de las planillas creadas “Cálculo acc diaria silos y minutos” y “Cálculo acumulación en agitadores”, las cuales usan los modelos de acumulación para obtener el cálculo de masa. El resultado del uso de estas planillas con datos tipo se explica a continuación.

### **4.2.1. Resultados acumulación de masa en Silo**

La planilla “Cálculo acc diaria silos y minutos” entrega 4 resultados en orden descendiente en su respectiva columna, el primero es la masa acumulada del día, calculada a partir de un delta de altura total día, a través de VBA; el segundo es la masa acumulada día calculada a partir de la integral de todos los delta de altura por minuto; el tercero es el delta de masa calculado en Excel®, la base del cálculo es la misma que el primer resultado pero realizado en Excel® y el último resultado es la masa acumulada calculada como la integral, símil del segundo resultado pero calculado en Excel®.

En la penúltima fila de los resultados se calcula la diferencia en tonelada entre la masa obtenida en VBA a través del delta total diario, usando las alturas finales e iniciales del día, primer resultado de la columna y la masa calculada en VBA a través de la integral, segundo resultado. En la última fila se indica la diferencia porcentual respecto al delta diario.

Los resultados de esta planilla para los diferentes casos de llenado y descarga mencionados en 3.2.1. Silos, con datos de prueba se aprecian en las tablas siguientes.

Las tablas 25 a la 28 muestran los resultados del caso 1. La Tabla 25 evidencia el resultado de masa acumulado para un caso de prueba dentro del caso 1 a) variación en el mismo nivel, específicamente de llenado en el primer nivel de silo, la Tabla 26 corresponde al caso 1 b) llenado dentro del segundo nivel. En cambio las tablas 27 y 28 ejemplifican el resultado de variación en un mismo nivel pero en donde la situación global es de descarga, la Tabla 27 muestra el caso

particular de descarga con alturas iniciales y finales dentro del segundo nivel caso 1 b) y la Tabla 28 es resultado del caso 1 c) descarga con alturas finales e iniciales dentro del tercer nivel.

De estas tablas se nota que la mayor variación entre el cálculo de masa acumulada a través del método de integración por cada minuto del día y la masa acumulada por medio del delta de altura total del día para el caso 1 de acumulación de masa en silos se presenta en la situación del caso 1 c) descarga dentro del tercer nivel Tabla 28 donde la diferencia es de 10.97 % para estos datos.

Además se debe notar que la sección del script en la herramienta Visual Basic, que calcula la acumulación en llenado y descarga manteniendo altura final e inicial dentro de un determinado nivel, los caso 1, es la misma. Sin embargo, en el caso de llenado, en un mismo nivel la mayor diferencia entre los métodos integral y delta se presenta en el primer tramo con un 10.73 %, Tabla 25 y en el caso 1 de descarga con alturas dentro de un mismo nivel, la mayor diferencia entre estos métodos se presenta cuando altura final e inicial están en el tercer nivel Tabla 28 con un 10.97 %. Así las diferencias entre los métodos dependen de las fluctuaciones de nivel que acontezcan durante el día y no de la sección del silo en que se encuentren las alturas.

Por otro lado en estas tablas no se tiene una diferencia apreciable entre la masa calculada a través de lo delta de altura en Excel, resultado número tres en la columna y la masa acumulada calculada a través de los delta de altura en VBA por lo que se verifica la confianza en los resultados.

*Tabla 25: Cálculo de acumulación en silo en el caso de llenado con alturas iniciales y finales en el primer nivel*

<b><math>\Delta M</math> ambas primer nivel [Ton]</b>	
2191.36	delta VBA
2426.49	integral VBA
2191.35	delta excel
2189.83	integral excel
235.13	diferencia integral y delta [ton]
10.73	% diferencia

Tabla 26: Cálculo de acumulación en silo para caso de llenado , con ambas alturas en el segundo nivel

<b><math>\Delta M</math> ambas segundo nivel [Ton]</b>	
2197.74	delta VBA
2432.88	integral VBA
2197.74	delta excel
2432.87	integral excel
235.13	diferencia integral y delta [ton]
10.70	% diferencia

Tabla 27: Resultado de cálculo de masa descargada con ambas alturas finales e iniciales en el segundo nivel

<b><math>\Delta M</math> ambas segundo nivel [Ton]</b>	
-2174.97	delta VBA
-1939.78	integral VBA
-2174.96	delta excel
-1939.77	integral excel
235.19	diferencia integral y delta [ton]
-10.81	% diferencia

Tabla 28: Resultado de masa descargada en silo con ambas alturas en el tercer nivel

<b><math>\Delta M</math> ambas tercer nivel [Ton]</b>	
-2150.21	delta VBA
-1914.31	integral VBA
-2150.21	delta excel
-1914.31	integral excel
235.90	diferencia integral y delta [ton]
-10.97	% diferencia

La Tabla 29 y Tabla 30 presentan algunos resultados del caso 2 de cálculo de acumulación de masa mientras se llena el silo en distintos niveles. La Tabla 29 muestra el caso 2 c) cálculo de masa acumulada en llenado de silo desde primer a tercer nivel en esta se nota que existe una diferencia entre el primer resultado de la columna y el segundo de un 3.82 %. En cambio, en la Tabla 30 se muestra el cálculo de masa acumulada para el caso 2 b) llenado entre segundo y tercer nivel en el que se aprecia una diferencia entre método integral y delta VBA de 23.17 [ton] lo que corresponde a 0.48 %, el caso de porcentaje de variación más bajo entre métodos.

En este segundo caso tampoco se nota diferencia entre el resultado de masa acumulada por el método de delta VBA y delta Excel, filas 1 y 3 de resultados.

*Tabla 29: Resultado de cálculo de acumulación de masa en silo para nivel inicial en primer nivel y altura final en el segundo nivel*

<b><math>\Delta M</math> en primer y segundo nivel [Ton]</b>	
4811.08	delta VBA
4627.20	integral VBA
4811.07	delta excel
4627.19	integral excel
-183.88	diferencia integral y delta [ton]
-3.82	% diferencia

*Tabla 30: Resultado acumulación caso de llenado desde segundo al tercer nivel de silo*

<b><math>\Delta M</math> en segundo y tercer nivel [Ton]</b>	
4808.05	delta VBA
4831.22	integral VBA
4808.04	delta excel
4813.06	integral excel
23.17	diferencia integral y delta [ton]
0.48	% diferencia

La Tabla 31 presenta el resultado de acumulación de masa en el caso 3 descarga de silo entre distintos niveles, específicamente el caso 3 a) descarga desde el tercer al primer nivel de silo, al usar datos de prueba cuya diferencia global va desde el tercer al primer silo pero los datos por minuto pueden fluctuar fuera de estos límites. En esta Tabla 31 se tiene una diferencia de 5.15 % entre los métodos de cálculo de masa delta e integral, siendo la menor diferencia presentada entre los casos 3. El resto de los ítems del caso 3 b y c) se muestran en anexos.

De igual manera que en los casos anteriores no se observa diferencia entre el resultado de masa acumulada en delta VBA y delta Excel ®.

*Tabla 31 : Descarga de masa desde el tercer al primer nivel de silo*

<b><math>\Delta M</math> en tercero a primer nivel [Ton]</b>	
-7274.68	delta VBA
-6899.70	integral VBA
-7274.67	delta excel
-6963.19	integral excel
-374.99	diferencia integral y delta [ton]
5.15	% diferencia

En todos los casos descritos en 3.2.1. Silos logran el cálculo de masa acumulada a través del método de delta VBA, se confía en este resultado puesto que se compara con el resultado que se obtendría con el cálculo manual de esta en Excel ®, tercer resultado.

Para todos los casos variación dentro de un mismo nivel, entre distintos niveles y descargas se tienen diferencias entre el método delta VBA e integral ya que el método de integral es más sensible a las fluctuaciones de nivel que este considera en cada minuto, tal como se comentó anteriormente para el resultado del caso 1 de acumulación de masa en silo y como ocurrió en el caso de cálculo de volumen acumulado en el estaque en la prueba de contrastación a flujómetro donde se usó el mismo método integral de trapecios. La menor diferencia en el cálculo de masa acumulada se encuentra en el caso 2 al llenar el silo desde el segundo al tercer nivel 0.48 % Tabla 30 y la mayor variación en el cálculo de masa se encuentra al descargarse el silo, con altura final e inicial dentro del tercer nivel caso 1 con un 10.97 % Tabla 28.



Las diferencias entre el método delta VBA e integral VBA se deben tener en cuenta cuando se quiere obtener la masa acumulada durante un periodo de tiempo menor a un día pues este es obtenido a través del método de la integral el cual varía más.

Como no existe protocolo de verificación en terreno del sensor que mide el nivel de altura en los silos, no se cuenta con el valor de P y por lo tanto se le asignaría el nivel más bajo de confianza dentro de un esquema de reconciliación de datos, a los datos de masa acumulada en silos, esto sería el lugar número 7, luego del densímetro con un factor de peso  $W=0.5$ .

#### 4.2.2. Resultados acumulación Agitadores

Los resultados de la planilla “Cálculo acumulación en agitadores” se muestran de la misma forma que en el caso del cálculo de acumulación diaria silos. Se entregan cuatro resultados en orden descendente, el primero es la masa acumulada total del día, a través del delta diario de altura, el segundo es el resultado de la integral, de los delta de altura por minuto el tercero y cuarto son los mismos que el primero y segundo con la salvedad de ser calculados en Excel®, en vez de VBA.

El siguiente recuadro en la planilla entrega la diferencia en toneladas entre la masa obtenida a partir del delta diario y la masa calculada a través de la integral del delta de altura por minuto y a continuación se presenta la diferencia porcentual entre estas respecto del delta diario.

Para probar la planilla se dieron dos casos; primero un caso de llenado y descarga a un ritmo aproximadamente constante y el segundo caso con llenado y descarga con fluctuaciones es decir bajadas no constantes de nivel cuando se estaba llenando y subidas aleatorias cuando se está descargando el agitador. Los resultados de estas pruebas se muestran en las siguientes tablas. La Tabla 32 y la Tabla 33 ejemplifican el resultado de cálculo de acumulación de masa para el caso de variación de datos a ritmo aproximadamente constante. Para el caso de llenado de agitador se tiene una diferencia entre el método integral por minuto y el delta total día de 4.12 %, Tabla 32 y para el caso de descarga de agitador se tiene una diferencia de 4.14 % Tabla 33.

Además, no se aprecia diferencia entre los resultados delta VBA y delta Excel®, filas 1 y 3 lo que permite verificar la confianza del resultado.

Tabla 32: Resultado en planilla "Cálculo acumulación agitadores" para el caso de llenado a ritmo aproximadamente constante.

$\Delta M$ [Ton]	
5237.78	delta VBA
5453.65	integral VBA
5237.77	delta excel
5453.64	integral excel
215.87	diferencia integral y delta [ton]
4.12	% diferencia

Tabla 33: Resultado en planilla "Cálculo acumulación agitadores" para el caso de una descarga a ritmo constante.

$\Delta M$ [Ton]	
-5301.50	delta VBA
-5081.94	integral VBA
-5301.48	delta excel
-5081.93	integral excel
219.56	diferencia integral y delta [ton]
-4.14	% diferencia

Las tablas 34 y 35 muestran el resultado de acumulación de masa en agitadores para datos de variación aleatoria. La Tabla 34 muestra el resultado en caso de llenado con este tipo de datos donde se tiene para esta ocasión una diferencia de 7.34 % entre el resultado obtenido por medio del delta total de altura diario y la integral por minuto, filas 1 y 2. La Tabla 35 muestra el resultado para el caso de descarga del agitador en la que se tiene una diferencia entre métodos de 8.20 %. En ambos llenado y descarga para datos de variación aleatoria se tiene una mayor diferencia que en el caso anterior en que los datos variaban de forma más constante por lo que una vez más se verifica que la diferencia del método de la integral depende de los datos.

Como se mencionó anteriormente en el caso de acumulación de masa en silos las diferencias entre el método delta VBA e integral VBA se deben considerar cuando se quiere obtener la masa acumulada durante un periodo de tiempo menor a un día pues este es obtenido a través del método de la integral.

Por otro lado, no se nota diferencia entre el resultado delta VBA y delta Excel ® al igual que en el caso de los datos de fluctuación a ritmo más constante.

*Tabla 34: Resultado de prueba en planilla “Cálculo de acumulación en agitadores” para el caso de un llenado con fluctuaciones aleatorias*

$\Delta M$ [Ton]	
2603.01	delta VBA
2794.17	integral VBA
2603.01	delta excel
2794.16	integral excel
191.15	diferencia integral y delta [ton]
7.34	% diferencia

*Tabla 35: Resultado de prueba en planilla “Cálculo de acumulación en agitadores” para el caso de descarga de agitador con fluctuaciones aleatorias*

$\Delta M$ [Ton]	
-2656.13	delta VBA
-2438.42	integral VBA
-2656.13	delta excel
-2438.41	integral excel
217.72	diferencia integral y delta [ton]
-8.20	% diferencia

Como no existe protocolo de verificación al igual que en el caso anterior de acumulación en silos no se cuenta con el valor de P y por lo tanto se le asigna el nivel más bajo de confianza en el esquema de reconciliación con un factor de peso  $W = 0.5$ .

### 4.3. Resultados análisis sensibilización densímetro

Como se ha mencionado anteriormente, la densidad de sólido de referencia para la calibración del instrumento densímetro de colas permanece fija en 3 [ton/m<sup>3</sup>], lo que podría afectar el resultado de porcentaje de sólido entregado por el densímetro y así el nivel de confianza del mismo. En esta última sección se analiza como varía el porcentaje de sólido al mover la densidad de sólido del relave en un monitoreo semanal de Septiembre, aprovechando los datos de las contrastaciones a densímetro.

En este monitoreo, a pesar de que existen datos de porcentaje de sólido cuyo mejor ajuste de distribución no es el normal, se acepta la normalidad ya que sus datos están dentro del límite de confianza de la distribución normal y, además, la diferencia entre los coeficientes de Anderson Darling (indicador de la calidad del ajuste a la distribución), de la distribución con mejor ajuste y la normal es pequeña, como se muestra en los anexos. Por lo tanto, para objeto de comparación de curvas de distribución de porcentaje de sólido y visualización del movimiento de la media se trabajan los datos como distribución normal.

Los resultados de las comparaciones realizadas del 7 de Septiembre, 14 de Septiembre, 21 de Septiembre y 28 de Septiembre, se muestran a continuación.

#### 4.3.1. Prueba de análisis de sensibilización del densímetro para el 7 de Septiembre

En el gráfico de análisis de sensibilidad de densímetro del 7 de Septiembre, mostrado a continuación, se tiene, de derecha a izquierda, en primer lugar la curva de porcentaje de sólido a densidad de sólido de 2.7 [ton/m<sup>3</sup>], alejada de esta pero a su izquierda, en verde, se tiene la curva de porcentaje de sólido usando densidad de sólido 3 [ton/m<sup>3</sup>], correspondiente al historial, seguido de esta, hacia la izquierda, en naranja, se presenta la curva de distribución de porcentaje de sólido del GER del día correspondiente a 3.09 [ton/m<sup>3</sup>], inmediatamente seguida por la curva de porcentaje de sólido a densidad de sólido de 3.1 [ton/m<sup>3</sup>]. En azul se encuentra la curva de distribución de porcentaje de sólido de los valores entregados por el laboratorio Mademet, de cada una de las muestras tomadas durante la contrastación y, finalmente, se ubica la curva de porcentaje de sólido dando una densidad de 3.2 [ton/m<sup>3</sup>].

De este gráfico se observa que si se aumenta la densidad de sólido las curvas se mueven hacia la izquierda, es decir, disminuye el porcentaje de sólido de pulpa y, por otro lado, la curva que más se acerca a la de Mademet corresponde a la distribución de porcentaje de sólido a la densidad de sólido de 3.1 [ton/m<sup>3</sup>] pero aun así no está sobre ella, por lo que la densidad de sólido de las muestras tomadas y analizadas en Mademet debería ser mayor a 3.1 [ton/m<sup>3</sup>].

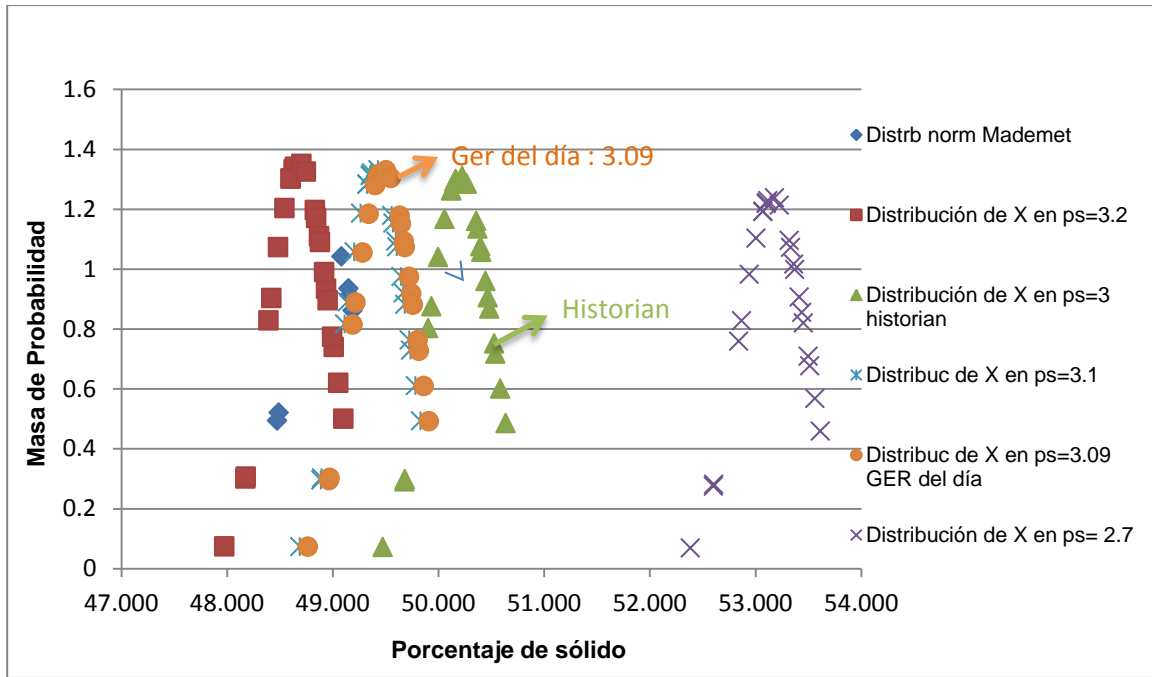


Figura 74: Curvas de distribución de porcentaje de sólido para prueba en Mademet en 7 de Septiembre y densidades de sólido 2.7, 3.0, 3.09, 3.1 y 3.2 [ton/m<sup>3</sup>].

En efecto, al realizar el cálculo de la diferencia entre la media de los porcentajes de sólido de las densidades de sólido estudiadas y la media del porcentaje de sólido de las muestras tomadas y luego analizadas por Mademet, se tiene que la menor diferencia se encuentra a la densidad de sólido de 3.2 [ton/m<sup>3</sup>], cuya media supera a la de Mademet en 0.24 puntos correspondientes a un 0.49 % de diferencia en la media de Mademet, tal como se muestra en la tabla siguiente:

Tabla 36: Tabla de comparación de medias de porcentaje de sólido a diferentes densidades de sólido con respecto a la media de laboratorio para prueba 7 de Septiembre

Densidad de sólido $\rho_s$ [ton/m <sup>3</sup> ]	3.00	2.70	3.20	3.10	3.09
Promedio porcentaje de sólido	50.21	53.16	48.69	49.41	49.49
Media Mademet	48.93	48.93	48.93	48.93	48.93
Diferencia en medias c/respecto mademet (obtenido- Mademet)	1.28	4.24	-0.24	0.49	0.56
% de diferencia en Mademet	2.62	8.66	-0.49	0.99	1.15

La segunda menor diferencia entre medias de porcentaje de sólido se presenta a la densidad de sólido de 3.1 [ton/m<sup>3</sup>] que corresponde a un 1 % de la media de porcentaje de sólido de Mademet. Además, se compara el porcentaje de sólido entre el entregado por las pruebas llevadas a laboratorio y el porcentaje de sólido obtenido si la densidad de sólido fuera el promedio obtenido en el día, esto es, el GER del día, dando una diferencia de 0.56 puntos, correspondientes a un

1.15%. Para ver si esta diferencia es estadísticamente significativa se someten los datos a prueba de hipótesis de diferencia de medias en minitab arrojando un  $P=0.01$ , afirmando que la diferencia es estadísticamente significativa. Figura 175.

#### 4.3.2. Análisis de sensibilización de densímetro para el 14 de Septiembre

Para el análisis de sensibilización de densímetro realizada el día 14 de Septiembre, a las mismas densidades de sólido que en el caso anterior, menos a valor de 2.7, y con un GER del día correspondiente a 2.97 [ton/m<sup>3</sup>], se tiene que en la gráfica de comparación de curvas de porcentaje de sólido nuevamente, a menor densidad de sólido, mayor es el porcentaje de sólido de la media y la curva que más se acerca a los datos de porcentaje de sólido entregados por Mademet, sin pasarla hacia la izquierda, es la curva a densidad de sólido a 3.1 [ton/m<sup>3</sup>], que en este caso se alcanzan a tocar pero no a solapar por lo que se podría inferir que la densidad de sólido de las muestras debería seguir siendo mayor a 3.1 [ton/m<sup>3</sup>]. También se nota que las curvas de porcentaje de sólido a valor de densidad de sólido promedio del día, GER del día, en naranja, están lejos de la curva de porcentaje de sólido de las muestras tomadas y luego analizadas en Mademet, curva azul.

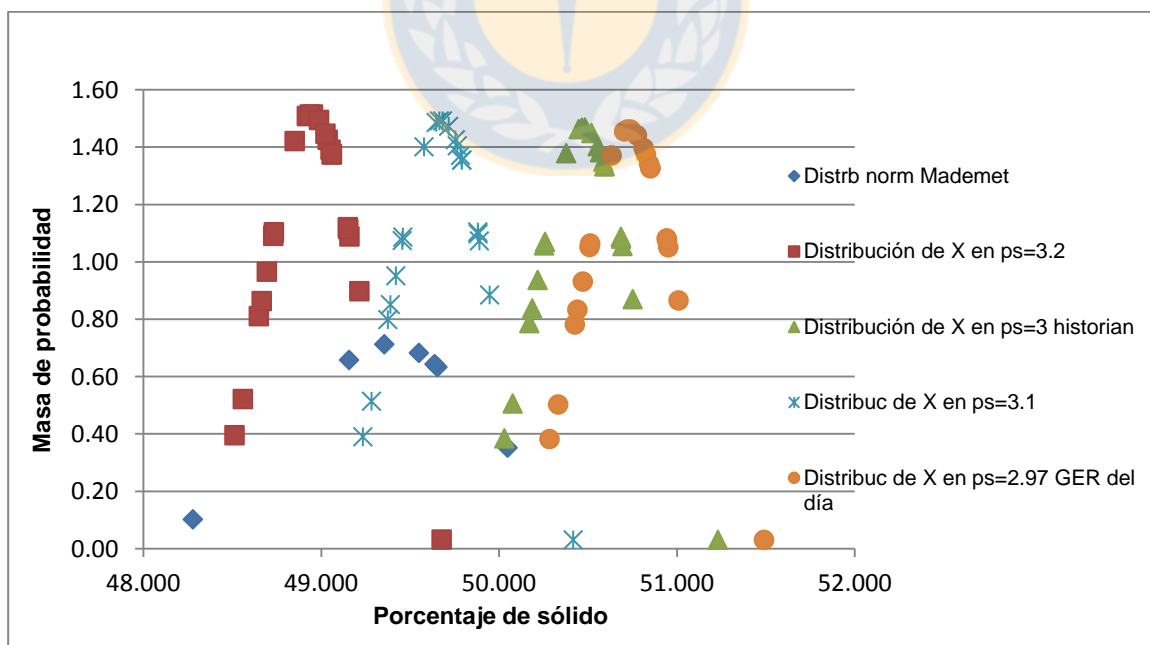


Figura 75: Curvas de distribución de porcentaje de sólido para prueba en Mademet y densidades de sólido 2.97, 3, 3.0 y 3.2 [ton/m<sup>3</sup>].

Al realizar el cálculo de la diferencia entre la media de los porcentajes de sólido de las densidades de sólido estudiadas y la media del porcentaje de sólido de las muestras tomadas, se tiene que la

menor diferencia se encuentra a la densidad de sólido de 3.1 [ton/m<sup>3</sup>], donde se tiene una distancia de 0.29 puntos correspondientes a un 0.59 % de diferencia en la media de Mademet, tal como se muestra en la tabla resumen siguiente;

*Tabla 37: Resultados de comparación de medias de porcentaje de sólido a diferentes densidades de sólido con respecto a la media de laboratorio para prueba 14 de Septiembre*

Densidad de sólido $\rho_s$ [ton/m <sup>3</sup> ]	3.0	3.2	3.1	2.97
Promedio porcentaje de sólido	50.44	48.95	49.67	50.73
Media Mademet	49.38	49.38	49.38	49.38
Diferencia en medias c/respecto Mademet (obtenido- Mademet)	1.06	-0.44	0.29	1.35
% de diferencia en Mademet	2.14	-0.89	0.59	2.73

Además, se compara el porcentaje de sólido entre el entregado por las pruebas llevadas a al laboratorio y el porcentaje de sólido obtenido, si la densidad de sólido fuera el promedio obtenido en el día , esto es el GER del día, dando una diferencia de 1.35 puntos correspondientes a un 2.73% . Para ver si esta diferencia es estadísticamente significativa se someten los datos a prueba de hipótesis de diferencia de medias en minitab arrojando un P=0.01 afirmando que la diferencia es estadísticamente significativa como se muestra en la Figura 176 en anexos.

#### 4.3.3. Prueba de análisis de sensibilización del densímetro para el 21 de Septiembre

Para el análisis de sensibilización del día 21 de Septiembre se estudiaron las densidades de sólido 3, 3.2, 3.1 [ton/m<sup>3</sup>] y la del GER del día a 3.12 [ton/m<sup>3</sup>] y se graficaron la curvas de distribución de porcentaje de sólido, obteniéndose que la curva en el extremo derecho es la curva con menor densidad de sólido y con mayor porcentaje de sólido y hacia la izquierda, las curvas con mayor densidad de sólido y menor porcentaje de sólido.

En este caso las curvas comienzan a tocar a la curva con los datos entregada por el laboratorio a partir de la curva de distribución de porcentaje de sólido con densidad de sólido de 3.1 [ton/m<sup>3</sup>], cayendo dentro de esta, la curva a densidad de sólido 3.2 [ton/m<sup>3</sup>]. Otra vez la densidad de sólido de la muestra debería ser mayor 3.1 [ton/m<sup>3</sup>]. Por otro lado, se nota que la curva con el GER del día, por primera vez, tiene una parte de ella dentro de la curva de distribución de porcentaje de sólido de la muestra tomada dentro de un instante del día y analizada en laboratorio.

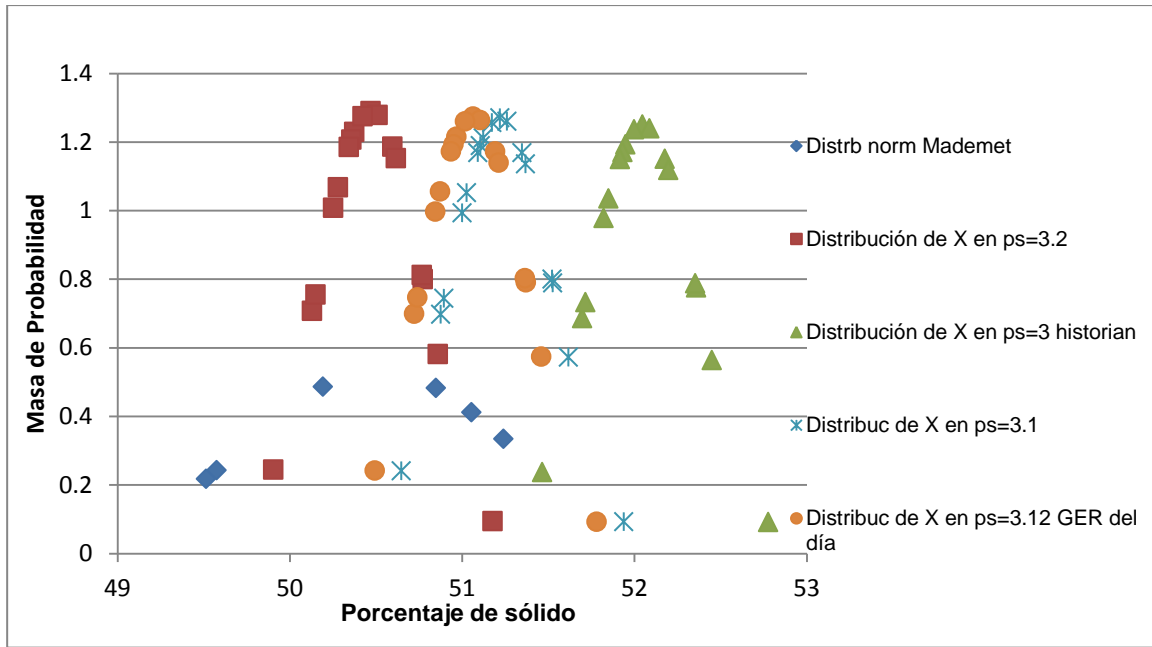


Figura 76: Curvas de distribución de porcentaje de sólido para prueba en Mademet en 21 de Septiembre y densidades de sólido 3.0, 3.1, 3.12 y 3.2 [ton/m<sup>3</sup>].

Lo anterior se puede verificar en la siguiente tabla, donde la menor diferencia de medias de porcentajes de sólidos se encuentra entre la media de Mademet y el porcentaje de sólido a densidad de sólido correspondiente a 3.2 [ton/m<sup>3</sup>] con una diferencia de 0.05, por sobre la media de Mademet, lo que significa 0.09 % de diferencia respecto a la media de Mademet, la segunda menor diferencia respecto a la media de laboratorio corresponde al porcentaje de sólido a la densidad de sólido del día, con una discrepancia de 0.55 puntos en porcentaje de sólido y 1.09 % en la media de la prueba.

Tabla 38: Comparación de medias de porcentaje de sólido a diferentes densidades de sólido con respecto a la media de laboratorio para prueba 21 de Septiembre

Densidad de sólido $\rho_s$ [ton/m <sup>3</sup> ]	3.0	3.2	3.1	3.12
Promedio porcentaje de sólido	52.05	50.47	51.22	51.06
Media Mademet	50.52	50.52	50.52	50.52
Diferencia en medias c/respecto Mademet (obtenido- Mademet)	1.53	-0.05	0.70	0.55
% de diferencia en Mademet	3.03	-0.09	1.40	1.09

Para comprobar la relación entre el GER de día y la media del porcentaje de sólido al momento de la prueba, se someten ambas medias a la prueba de hipótesis de diferencias de medias en minitab arrojando un P=0.11, Figura 177 anexos, indicando que la diferencia no es estadísticamente



significativa. Por lo tanto, la densidad de sólido de la prueba en esta ocasión debería ser mayor a 3.12 y menor a 3.2 [ton/m<sup>3</sup>].

#### 4.3.4. Análisis de sensibilización de densímetro para el 28 de Septiembre

Para el análisis de sensibilización de densímetro realizada el 28 de Septiembre se grafican las distribuciones de porcentaje de sólido a densidades de sólido 3.09 [ton/m<sup>3</sup>], correspondiente al GER del día, a 3 [ton/m<sup>3</sup>] respectivos del historian, a 3.1 y 3.2 [ton/m<sup>3</sup>]. La curva del extremo derecho, es la perteneciente a los datos del densímetro en línea, con menor densidad de sólido y mayor porcentaje de sólido. Hacia la izquierda se van presentando las curvas con mayor densidad de sólido y menor porcentaje de sólido, las cuales comienzan a acercarse a la curva de los datos de laboratorio a partir de la curva a densidad de sólido del día 3.06 [ton/m<sup>3</sup>], sin embargo, la curva a densidad de sólido 3.1 [ton/m<sup>3</sup>] no alcanza a solapar la curva de distribución de porcentaje de sólido de Mademet para la prueba por lo que otra vez la densidad de sólido al momento de la prueba debe ser mayor a 3.1 [ton/m<sup>3</sup>].

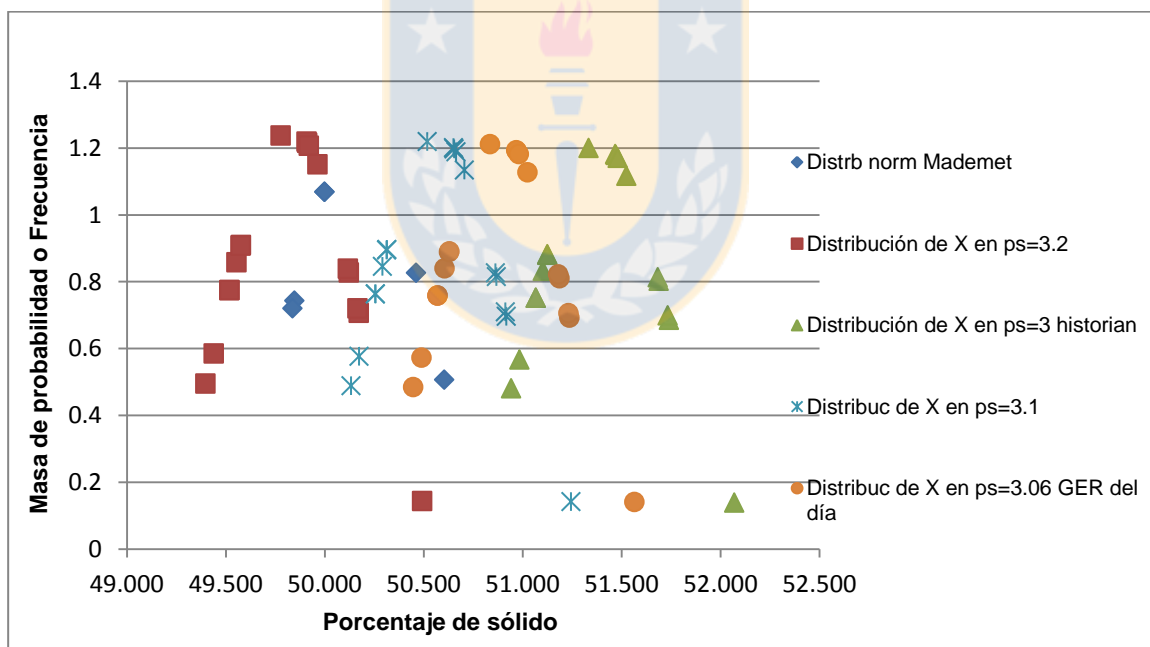


Figura 77: Curvas de distribución de porcentaje de sólido para prueba en Mademet en 28 de Septiembre y densidades de sólido 3.0, 3.06, 3.1 y 3.2 [ton/m<sup>3</sup>].

Al efectuar el cálculo de comparación de medias de porcentaje de sólido, en la tabla siguiente, se tiene que: la menor diferencia se presenta a la densidad de sólido 3.2 [ton/m<sup>3</sup>], que sobrepasa el porcentaje de sólido de la prueba en 0.34 puntos, es decir, en 0.68 %, seguido de la diferencia a la densidad de sólido de 3.1 [ton/m<sup>3</sup>], de 0.40 puntos o 0.80 % y en tercer lugar de menor

diferencia se ubica el porcentaje de sólido del GER del día con 0.72 puntos de diferencia correspondientes a un 1.43 % en la media del porcentaje de sólido de Mademet.

*Tabla 39: Comparación de medias de porcentaje de sólido a diferentes densidades de sólido con respecto a la media de laboratorio para prueba 28 de Septiembre*

Densidad de sólido $\rho_s$ [ton/m <sup>3</sup> ]	3.0	3.2	3.1	3.06
<b>Promedio porcentaje de sólido</b>	51.39	49.83	50.57	50.89
<b>Media Mademet</b>	50.17	50.17	50.17	50.17
<b>Diferencia en medias c/respecto Mademet (obtenido- Mademet)</b>	1.22	-0.34	0.40	0.72
<b>% de diferencia en Mademet</b>	2.42	-0.68	0.80	1.43

Al igual que en los casos anteriores se realiza una prueba de hipótesis de comparación de medias entre el porcentaje de sólido de a densidad de sólido del GER del día y la media del porcentaje de sólido de la prueba, resultando un  $P=0.00$ , significando que otra vez la media del porcentaje de sólido de la prueba no tendría relación con el porcentaje de sólido medio del GER del día, Figura 178.



## 5. Conclusiones

### 5.1. Conclusiones contrastación de instrumentos

#### 5.1.1. Flujómetro

1. Según el valor  $P=0.767$  en la prueba de hipótesis estadística de comparación de media,  $t$  de dos muestras, se concluye que la diferencia de  $2.27$  [L/s], entre los datos del flujómetro y la prueba de referencia no es estadísticamente significativa y se admite una variación de hasta  $3.8\%$  en el flujómetro para seguir teniendo confianza estadística.
2. El valor de  $P=0.767$  ubica al flujómetro en el número 6, en el orden de desviación, es decir es el instrumento más confiable dentro de los evaluados y su factor de peso dentro del esquema de balance reconciliado por el método de multiplicadores de Lagrange, según su valor de  $P$ , es de  $W=1$ .

#### 5.1.2. Densímetros

1. Existe una diferencia promedio en porcentaje de sólido de  $1.80$ , entre la referencia de porcentaje de sólido entregado por laboratorio Mademet y los datos de porcentaje de sólido extraídos desde el historial del densímetro de colas según las pruebas de contrastación, lo que indica que el densímetro estaría marcando un porcentaje de sólido mayor en un  $1.80$ . Esto corresponde a una variación de  $3.68\%$  respecto a la referencia y a un  $3.52\%$  de variación en el densímetro, que según los resultados de las prueba  $t$  de hipótesis, en el que cada prueba arrojó un valor de  $P=0$ , y cuyo resultado global por lo tanto es  $P=0$ , se concluye que esta diferencia es estadísticamente significativa.
2. En el orden de desviación de los instrumentos evaluados el densímetro se ubica en el lugar número 1, es decir, es el instrumento en que se tiene menor confianza y cuyo factor de peso es de  $W=0.5$ .

#### 5.1.3. Pesómetros

##### 5.1.3.1. Pesómetro Preconcentrado Molino 4

1. Según las pruebas de contrastación el pesómetro estaría midiendo  $28.43$  [t/h] más que la referencia, esto equivale a una variación promedio de  $6.95\%$  respecto

a la media de referencia y a 6.35% respecto de la media del pesómetro de preconcentrado del molino 4. Esta diferencia no es estadísticamente significativa, según el resultado de las pruebas t de hipótesis de comparación de dos medias, en las que cada prueba entrega un valor de P mayor 0.05 y un promedio global de  $P= 0.403$  por lo que se admite una variación promedio de 6.35% en el pesómetro para seguir teniendo confianza estadística en el pesómetro.

2. En el orden de desviación el pesómetro de preconcentrado del molino 4 se encuentra en el número 5, es el instrumento más confiable de los analizados, luego del flujómetro de colas y su factor de peso es de  $W=0.76$

### 5.1.3.2. Pesómetro Preconcentrado Molino 3

1. Según la prueba de contrastación, el pesómetro presenta un valor superior en 13.82 [ton/hr] respecto al valor real o su referencia, lo que corresponde a 6.19% en la media de referencia y a 5.73% de la media del pesómetro. Sin embargo, esta diferencia no es estadísticamente significativa, conforme con lo entregado en la prueba de hipótesis t, donde se tiene un  $P= 0.111$ , aceptando así una variación de hasta un 5.73% en el pesómetro del molino 3.
2. Según el valor de P, el pesómetro de preconcentrado a molino 3 se ubica en el lugar número 3 en el orden desviación, es decir es el instrumento en el lugar número 4 de confianza y su factor de peso para la metodología de ajuste de balance por medio de multiplicadores de Lagrange es de  $W=0.57$ .

### 5.1.3.3. Pesómetro Preconcentrado a Silos

1. Según la prueba de contrastación, el pesómetro de preconcentrado estaría midiendo 155.77 [ton/hr] más que la referencia, esto equivale a una variación promedio de 5.50% respecto a la media de referencia y a un 5.19% respecto al promedio del pesómetro de preconcentrado a silos. Esta diferencia es estadísticamente significativa, de acuerdo con los resultados de la prueba de hipótesis de comparación de medias, t pareada, donde se tiene un valor  $P= 0.039$ . Lo anterior indica que con la presente diferencia no se tiene confianza estadística en este pesómetro y se debería modificar este en un 5.19%.
2. A pesar de lo anterior, como el valor de P es mayor que el valor de P obtenido en la del densímetro, se ubica al pesómetro de preconcentrado a silos en el orden

de desviación número dos, es decir tiene el lugar número 5 en confianza, dentro de los 6 instrumentos verificados y su factor de peso es de  $W=0.53$ .

#### 5.1.3.4. Pesómetro Pellet Producto

1. Se encontró una variación promedio de 4.74 [ton/hr], entre la media del método de referencia y la media del pesómetro, por lo tanto el pesómetro estaría midiendo más que el valor real, en la cantidad antes mencionada. Esta diferencia corresponde a una variación de 1.09% respecto de la media de referencia y a un 1.07% de variación en el pesómetro de pellet producto, lo que no es estadísticamente significativo, según la prueba de t de hipótesis de comparación de medias, donde se obtiene un valor de  $P=0.310$ . En consecuencia, se sigue teniendo confianza estadística en este.
2. En el orden de desviación el pesómetro pellet producto se ubica en el lugar número 4, es decir, es el instrumento con mayor confiabilidad luego del flujómetro y el pesómetro de molino 4. Así, su factor de peso quedó estipulado en  $W=0.71$ .

## 5.2. Conclusiones cálculo de acumulación

### 5.2.1. Silos

1. Planilla "Cálculo acc. silos diaria y minutos" logra el cálculo aproximado de masa acumulada en el silo. Sin embargo, se debe tener en consideración cuando se desea obtener una aproximación de la masa acumulada dentro de un periodo menor a un día que existe una variación entre el cálculo hecho por integral y delta total que varía desde un 0.48 a 11 %.
2. Las diferencias entre el método integral por minuto y delta de altura total día dependen de las fluctuaciones de nivel que acontezcan durante el día y no de la sección del silo en que se encuentren las alturas. Esto, según las diferencias en los resultados entre métodos de cálculo de masa apreciados en los casos 1 de descarga y llenado ya que la sección del script en la herramienta Visual Basic que calcula la acumulación en llenado y descarga manteniendo altura final e inicial dentro de un determinado nivel es la misma pero, en el caso de llenado, en un mismo nivel la mayor diferencia entre los métodos integral y delta se presenta en el primer tramo con un 10.73%, Tabla 25 caso 1 b) y en la descarga con alturas dentro de un mismo nivel, la mayor diferencia entre estos métodos se

presenta cuando altura final e inicial están en el tercer nivel caso 1 c) con un 10.97, Tabla 28.

3. La masa obtenida con esta planilla se ubica en el último nivel de confianza, bajo el densímetro, esto correspondería al número 7 en orden de confianza, con un factor de peso  $W=0.5$

### 5.2.3. Agitadores

1. La planilla “Cálculo acumulación agitadores” realiza el cálculo de masa acumulada diaria en ambos agitadores. Cuando el llenado y descarga se efectuara de forma aproximadamente constante, se tendría una diferencia entre el cálculo de masa a través del nivel final e inicial y el cálculo a través de la integral de todos los delta de altura, de 4.12% y 4.14%, respectivamente, como se muestra en las tablas 32 y 33. Para el caso en que el llenado y descarga viene con variaciones aleatorias de nivel se observa una diferencia mayor correspondiente a 7.34% y 8.20%, respectivamente. Por lo tanto, las diferencias entre métodos dependen de las fluctuaciones de los datos que se estén tratando. Estas diferencias son relevantes cuando se considera la acumulación instantánea de masa o en intervalos de tiempos menores a un día.
2. La masa obtenida en esta planilla se ubica en la misma posición de confianza que la planilla de cálculo de masa de silos, esto es, el lugar número 7 en orden de confianza y su factor de peso corresponde a  $W=0.5$ . Esto debido a que no existe protocolo de verificación en terreno del sensor de nivel en los agitadores.

### 5.2.4. Espesador

1. Para obtener el inventario de sólidos dentro del espesador se requiere conocer el perfil de concentración dentro del mismo, lo que se puede lograr a través de instrumentación como la de Column Test.

### 5.3. Análisis de sensibilización de densímetro de colas

1. De los análisis realizados al densímetro de relaves se concluye que al aumentar la densidad de sólido de la pulpa de relave disminuye el porcentaje de sólido de la misma.
2. La densidad de sólido en cada una de las pruebas debería ser mayor a 3.1  $[\text{ton}/\text{m}^3]$  y menor a 3.2  $[\text{ton}/\text{m}^3]$ .

3. La diferencia entre el porcentaje de sólido de la muestra y el porcentaje de sólido que entregaría el densímetro al usar la densidad de sólido promedio del día, GER del día, en vez del valor fijo en 3 [ton/m<sup>3</sup>], es estadísticamente significativa, salvo en la única prueba en que el GER del día es 3.12 [ton/m<sup>3</sup>]. Esto es las diferencias de 0.56, 1.35 y 0.72 puntos en porcentaje de sólido de las pruebas 7, 14 y 28 de Septiembre son estadísticamente significativas.

Todos los niveles de confianza de la instrumentación obtenidos a través de los test estadísticos en la presente memoria asignan factores de peso a las corrientes, estos factores de peso son primordiales en la realización de la forma matricial del balance metalúrgico reconciliado por multiplicadores de Lagrange pues es el asunto de mayor dificultad de obtención en este esquema y contribuyen en la formación de la primera submatriz de Lagrange y el vector de valores medidos desajustados. Con la totalidad de los factores de peso, los flujos máxicos de cada una de las corrientes que participan en el balance y los flujos máxicos por día obtenidos a través de las planillas de cálculos de acumulación masa se estaría en condiciones de construir el modelo matricial de ajuste por multiplicadores de Lagrange como se muestra en el anexo A.



## **6. Recomendaciones**

### **6.1 Recomendación en pruebas de contrastación**

#### **Contrastación Flujómetros**

Se recomienda intentar un flujo de prueba constante de modo de no tener mayor variación en la media.

Para la prueba en terreno se debe asegurar radios de comunicación para quien registre la profundidad y para quien inspeccione el nivel de llenado. Además, no se deben sobrepasar el 60% de llenado de pulpa para evitar problemas de embancamiento de estanque.

Se recomienda repetir la prueba para verificar buen funcionamiento del flujómetro con más de una contrastación.

#### **Contrastación Densímetro**

Se debe tener cuidado de alcanzar a muestrear todo el flujo, en cortes de ida y vuelta, se debe tratar de pasar a velocidad constante y no se debe regresar demasiado pronto de modo de asegurarse pasar cada borde del flujo. Para comprometer que todas las partes del incremento entren en el cortador se recomienda usar cortagotas y cortadores de aberturas más anchas.

Si el flujo es muy turbulento se recomienda extenderlo, de forma que se comporte más laminar y no rebote en el cortador.

Se recomienda la extracción de datos por minuto del densímetro para la obtener la media del instrumento a contrastar ya que por segundo hay mucha variación y presencia de datos que se escapan del rango de confianza que luego hay que eliminar generando un doble trabajo de filtración de estos.

#### **Contrastación Pesómetros**

Se recomienda repetir las pruebas a una misma media o set point con el fin de contar con al menos 8 cortes de metro para una misma media indicada en el pesómetro. Además, es de suma importancia la coordinación previa con las unidades involucradas, ya que se necesitan al menos 6 personas para trabajar simultáneamente y disminuir los tiempos de detención.

El masado se recomienda hacer en una balanza de pesaje estático, de precisión 0.1% y la cual deberá calibrarse periódicamente.

Los instrumentos de corte de metro deberán ser revisados en su calidad antes de ser utilizados, esto es, verificar que contengan un metro de largo, que no cuenten con abolladuras y que el ancho y largo de los bordes sean los adecuados para el material y correa a contrastar.



El traspaso de material desde correa a bolsas debe ser cuidadoso para no perder material, estas bolsas deben ser medianas de modo de no superar los 20 [kg] en cada una. En correas de mayor tonelaje es preferible usar baldes de superior capacidad y previamente masados.

Se recomienda la extracción de datos por minuto, cuando no sea posible utilizar los testigos para eliminar variabilidad.

En el pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos se recomienda repetir la prueba cuando la carga de material sea más estable, contando con las herramientas para abrir las cubiertas de la correa que puedan facilitar el retiro de material y mayor personal de apoyo para optimizar el tiempo de detención en una correa de alto tonelaje.

Además, repetir la prueba de contrastación en pesómetro de pellet producto de modo de verificar su confianza debido a las variaciones presentadas en sus cortes.

Por otro lado realizar contrastaciones en los pesómetros que no fueron evaluados como pesómetros de alimentación a molinos y pesómetro de pellet feed para poder conocer su confianza y factor de peso.

En cuanto a la instrumentación, se recomienda contar con pesómetro de 4 bancadas de polines de pesaje, que se ubique en un lugar de mínima tensión de la correa, en forma horizontal y nivelado [21], lo que no se cumple en la ubicación del pesómetro de alimentación a molino 3, cuya posición es inclinada.

### **Frecuencia de Contrastación**

Se recomiendan realizar pruebas de contrastación cada dos meses [21]. Sin embargo, si se quiere asegurar confianza y calidad de los datos a utilizar en el balance metalúrgico mensual se recomienda una verificación mensual para saber si hubo algún problema en el sistema de medición que pudiera afectar los datos, la confianza en ellos y los respectivos factores de peso.

Por otro lado, también se deberán realizar contrastaciones cada vez que existan variaciones y modificaciones al sistema de medición, como por ejemplo, luego de cambiar o calibrar un flujómetro, densímetro o pesómetro, cambios a celdas de cargas, modificaciones a polines en la zona de pesaje, cambios en correa, etc.

Se recomienda llevar un registro de cada sistema de medición por al menos tres años, con el fin de contar con una historia del rendimiento del sistema, en el que se incluya resultados de las pruebas de contrastación y porcentajes de error encontrados.

## **6.2. Recomendaciones cálculos de Acumulación**

### **Recomendación acumulación silos y agitadores**

Se recomienda confiar en la aproximación del cálculo de masa acumulada realizado a través del delta de altura final e inicial en VBA (primer valor en las filas de resultado), pues la integral agrega mayor variabilidad, según la sensibilidad del sensor, esto es, toma en cuenta subidas y bajadas de nivel que no tienen importancia en el resultado diario total.

Se recomendaría la utilización de más de un sensor de nivel y obtener un promedio del nivel de llenado pues podría ocurrir que el único sensor este midiendo un peak del volumen de llenado, en el caso del silo.

Se recomienda la inversión en sensores de nivel de los silos restantes con el fin de poder saber la cantidad de masa acumulada en ellos y cuál es su influencia en el balance másico.

### **Recomendación acumulación espesador**

Para obtener el inventario dentro de un espesador se requiere conocer el perfil de concentración dentro de él por lo que se recomienda contar con alguna instrumentación que lo calcule o lo aproxime como el Column test.

## **6.3. Recomendaciones análisis de sensibilización de densímetro de colas**

La densidad de sólido a la que se calibra el densímetro debería ser mayor a 3.1 [ton/m<sup>3</sup>], según el resultado de las pruebas analizadas.

Cuando se lleven a cabo campañas para obtener un producto de mayor ley, se debe considerar la existencia de magnetita, la que subiría la densidad de sólido de relave, por lo tanto se debería subir la densidad a la que se calibra el densímetro. Por ejemplo, cuando se realizan campañas para obtener un producto en pellet feed de mayor ley, se presenta mayor cantidad de magnetita (5.2 [ton/m<sup>3</sup>]) lo cual subiría la densidad de sólido de la pulpa de relave. Por lo tanto, cuando se esté en este periodo de campaña se recomienda recalibrar el densímetro con una densidad de sólido más alta que 3 y más cercana a la que tendría el relave en ese momento.

## **6.4 Recomendaciones generales para balance masa reconciliado**

Para llevar a cabo el balance másico por método de ajuste metalúrgico con multiplicadores de Lagrange se necesita información redundante y valores independientes no correlacionados por lo que se recomienda; la instalación de un pesómetro para contabilizar el material que va a balling y cerrar el nodo de filtrado, aprovechando que se cuenta con pesómetro de pellet feed; instalación

de flujómetro y densímetro en las corrientes que alimentan a los agitadores y filtrado para poder cerrar el nodo agitadores aprovechando que se cuenta con la planilla que calcula la masa acumulada como otra de las corrientes en este nodo; cuidar que la instalación de nueva instrumentación tenga la disposición física para poder realizar contrastaciones. Cuando no sea posible la contrastación de flujómetros, a través de los protocolos establecidos en la presente memoria de título se recomienda el uso de trazadores nucleares para la contratación de flujos, el trazado nuclear tiene la ventaja de no requerir modificaciones a las tuberías de proceso ni a la operación y no perturban el proceso [22]. Además, se recomienda ir cerrando el esquema de nodos de reconciliación desde aguas abajo hacia arriba en el área de molienda- concentración, es decir, desde agitadores hacia espesadores de modo de mantener el control y mayor confianza sobre un área que permita revisar de mejor forma de donde provendría alguna posible falla a futuro.



## 7. Bibliografía

- [1] Wills, B. & Finch, J. (2016). Mineral Processing Technology. Oxford, Uk: Elsevier Ltd.
- [2] Capmineria.cl. (2019). CAP Minería - Operaciones y Productos. Disponible en: <http://www.capmineria.cl/capmineria/site/edic/base/port/operaciones.html>. [Accedido en Marzo 2019].
- [3] CAP Minería. (2016). Descripción Proceso Productivo e Instalaciones. Huasco, Chile: Planta de Pellets Huasco.
- [4] CAP Minería. (2016). Presentación Proceso Planta.
- [5] CAP Minería. (2009). Programa Seminario Ingeniería Civil Metalurgia: Descripción del Proceso Molienda y Concentración.
- [6] Revista ElectroIndustria – Pesaje dinámico en transporte de sólidos. (2019). Disponible en: <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=264>. [Accedido en Agosto 2019].
- [7] Gutiérrez, L. (2017). Procesamiento de Recursos Mineros no Cupríferos. Capítulo 2: Balance Metalúrgico. Concepción: Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- [8] Departamento de Matemática Universidad de Atacama. (2019). Curso: Estadística. Disponible en: <http://www.mat.uda.cl/hsalinas/cursos/2011/2do/clase2.pdf>. [Accedido en Junio 2019].
- [9] Walpole, R., Myers, R., & Myers, S. (2007). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias (8a. ed.). Distrito Federal, México: Pearson Educación.
- [10] Gutiérrez Pulido, H., & Vara Salazar, R. (2009). Control estadístico de calidad y Seis Sigma (2a. ed.). Distrito Federal. México: McGraw-Hill Interamericana.
- [11] Mendenhall, W., & Sincich, T. (1997). Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias (cuarta edición). México: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- [12] Quality Collage. (2018). Técnicas de caracterización estadística de procesos con Minitab: Test de Hipótesis e Intervalos de Confianza.
- [13] Support.minitab.com. (2019). El estadístico Anderson Darling [Online] Disponible en: <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/help-and-how-to/statistics/basic-statistics/supporting-topics/normality/the-anderson-darling-statistic/>. [Accedido en Noviembre 2019].
- [14] Marqués dos Santos, María José; Estadística Básica: un enfoque no paramétrico, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Zaragoza.

- [15] R. Spiegel, M, Jhon Schiller, R. Alu Srinivasan. (2013). Probabilidad y estadística. 4th ed. México: Mc Graw Hill.
- [16] CODELCO. (2005). NORMA CODELCO CNAM 007: Condiciones De Estaciones de Muestreo De Flujo De Materiales y Transferencia De Productos, Gerencia Técnica Vicepresidencia Corporativa De Proyectos.
- [17] Bob Maron, Christian O'Keefe, Alex van der Spek, Philip Stacy. (2011). Verificación de la precisión de los flujómetros instalados en las plantas de procesamiento de minerales. 8º Encuentro de Mantenedores de Plantas Mineras, MAPLA. Chile.
- [18] CAP Minería. (2007). Esquema de Correas.
- [19] Concha, F. (2001). Manual de filtración & separación. Concepción: Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Metalúrgica.
- [20] Cettem Instruments (2018). Mediciones en Planta.
- [21] CODELCO. (2004). NORMA CODELCO CNAM 014: Condiciones estándar mínimas de sistemas de pesajes en correas transportadoras para puntos de balance metalúrgico y transferencia de materiales, Gerencia Corporativa de Recursos y Evaluación Minera Vicepresidencia de Recursos Mineros y Desarrollo.
- [22] Trazado Nuclear. (2018). Presentación General Servicios Trazado Nuclear. Disponible en: <http://www.trazadonuclear.cl/wp-content/uploads/2016/07/1-Presentacion-General-Servicios-Trazado-Nuclear.pdf>. [Accedido en Junio 2018].

## ANEXOS A: Anexos de Antecedentes

### Método de ajuste metalúrgico por multiplicadores de Lagrange

El ajuste con multiplicadores de Lagrange busca la mejor estimación de los valores teóricos minimizando el criterio de los mínimos cuadrados y se logra a través de la solución de una serie de ecuaciones que se pueden expresar de forma matricial

$$\begin{pmatrix}
 W_1 & 0 & \dots & 0 & \vdots & K_{11} & K_{21} & \dots & K_{n1} \\
 0 & W_2 & \dots & \vdots & \vdots & K_{12} & K_{22} & \dots & K_{n2} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 0 & 0 & \dots & W_m & \vdots & K_{1m} & K_{2m} & \dots & K_{nm} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 K_{11} & K_{12} & \dots & K_{1m} & \vdots & 0 & 0 & \dots & 0 \\
 K_{21} & K_{22} & \dots & K_{2m} & \vdots & 0 & 0 & \dots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nm} & \vdots & 0 & 0 & \dots & 0
 \end{pmatrix}
 \cdot
 \begin{pmatrix}
 F_1 \\
 F_2 \\
 \vdots \\
 F_m \\
 \vdots \\
 \lambda_1 \\
 \lambda_2 \\
 \vdots \\
 \lambda_n
 \end{pmatrix}
 =
 \begin{pmatrix}
 W_1 f_1 \\
 W_2 f_2 \\
 \vdots \\
 W_m f_m \\
 \vdots \\
 0 \\
 0 \\
 \vdots \\
 0
 \end{pmatrix}$$

$A$ 
 $B$ 
 $C$

Figura 78: Forma matricial de ajuste metalúrgico por medio de multiplicadores de Lagrange

Donde se tiene un vector de **valores ajustados** “B” que se multiplican por la matriz de Lagrange “A” y se igualan a un vector de valores medidos desajustados “C”

Sin embargo en la práctica lo que se tiene son los valores medidos desajustados y para encontrar los valores ajustados se debe multiplicar la inversa de la matriz de Lagrange por el vector de valores desajustados.

$$B = A^{-1} * C \quad (8.1)$$

La matriz de Lagrange se construye a partir de la unión de 4 submatrices cuyos ejes son corrientes y luego nodos.

La primera submatriz se compone del vector factores de peso, dados a cada corriente, multiplicado por una matriz identidad de rango igual al número total de corrientes, por lo que la matriz tiene tantas columnas como corrientes.

La segunda submatriz se adosa bajo la primera submatriz y corresponde a una matriz de coeficientes  $K_{ji}$ , donde “j” representa el nodo y el número de restricciones, e “i” el número de la corriente. Por lo tanto esta matriz tiene tantas filas como nodos o restricciones y tantas columnas como corrientes. Se asigna el valor 1 a las corrientes que entran a un nodo y -1 a las corrientes

que salen del nodo, tal como en un modelo de redes donde una secuencia entrante se representa con 1, un flujo saliente con un  $-1$ . Si una corriente no participa en el nodo se le da el valor de cero al coeficiente

La tercera submatriz de Lagrange corresponde a la transpuesta de la matriz de coeficientes, es decir la transpuesta de la segunda submatriz y se adosa al lado derecho de la primera

La cuarta submatriz de Lagrange es una matriz de ceros que se agrega para hacer cuadrar la matriz de Lagrange y se ubica a la derecha abajo, al lado de la segunda submatriz.

### Consideraciones del modelo

Estos valores medidos deben ser independientes, no correlacionados unos con otros, además la información debe ser redundante para poder aplicar la técnica de reconciliación de datos, es decir tener más ecuaciones que incógnitas.

### Anexos instrumentos de medición

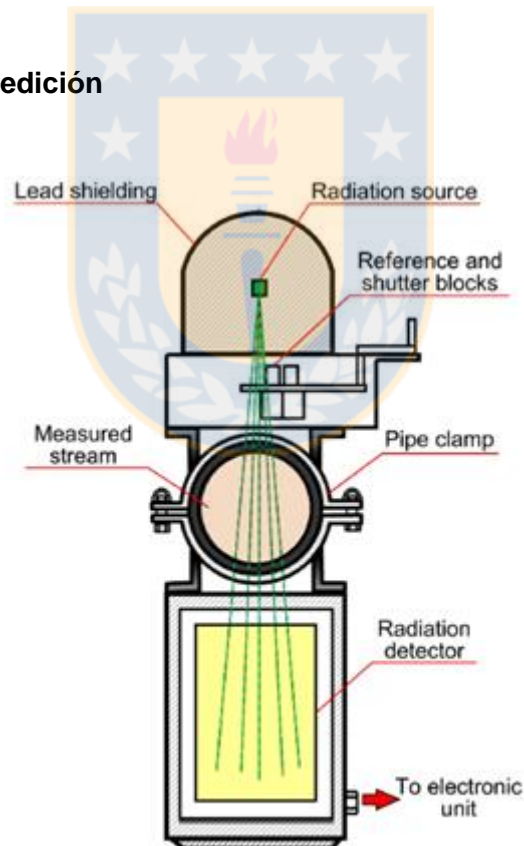


Figura 79: Esquema funcionamiento densímetro nuclear, tomada de Mineral Processing Technology [6]

## **ANEXOS B: Anexos de Metodología**

### **Procedimiento en terreno para verificación de flujómetro FIT 798.**

- 1) Se determina junto al jefe de operaciones y jefe de turno si es factible la realización de la prueba, dependiendo de la densidad del relave y torque del espesador.
- 2) Para la prueba se usará la bomba que esté operando.
- 3) Se procede a abrir la válvula HV-799D2 de recirculación de pulpa al espesador y cerrar válvula HV-799D1, Figura 80, para no dejar pasar pulpa al estanque TK-17 mezclador/desaireador, Figura 29.
- 4) Una vez cerrado el flujo de pulpa al estanque TK-17, se continua con el lavado del mismo, con las bombas de agua de mar 6234-1 y 6234-2, manteniendo la descarga hacia Chapaco, es decir con bombas 6233-1 y 6233-2 abiertas
- 5) En terreno se debe revisar el lavado del estanque, para dar termino a este y detener las bombas 6234-1 y 6234-2.
- 6) A continuación, se vacía el estanque TK-17 de modo que se mantiene en funcionamiento las bombas 6233-1 y 6233-2 de descarga hacia Chapaco.
- 7) Cuando el estanque este completamente vacío se detienen las bombas 6233-1 y 6233-2 para luego cerrar sus respectivas válvulas.
- 8) Se debe ascender a la parte superior del estanque para medir el área figuras 30 y 31.
- 9) Para comenzar la contrastación se abrirá la válvula HV-799D1 que abre el paso de la pulpa que viene desde el espesador de colas al estanque desaireador y se cerrará la válvula HV-799D2 de recirculación.
- 10) El jefe de turno deberá ajustar la velocidad de la bomba, hasta alcanzar un flujo aproximadamente constante
- 11) Se debe registrar la hora de inicio de la contrastación
- 12) Se deberían considerar los datos del sensor que estén sobre un 10% de llenado, pues datos de llenados pueden contener mucha variación.
- 13) Se necesitan dos personas con radio, una ubicada frente a la pantalla de niveles verificando que el estanque no sobrepase el 60% en la prueba y otra en la parte superior del estanque verificando misma situación, por si la pantalla fallase.
- 14) Una vez finalizada la prueba se pondrán en marcha las bombas 6234-1 y 6234-2, de agua de mar y las bombas 6233-1, 6333-2, con sus respectivas válvulas.



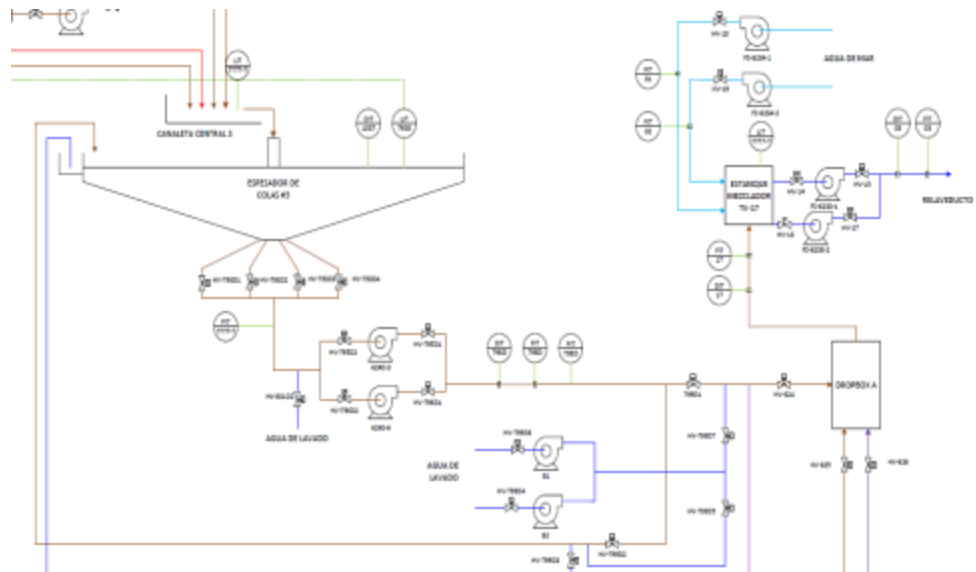


Figura 80: Diagrama de válvulas espesador de colas 3.

### Procedimiento en operaciones para contrastación de densímetro

- 1) Avisar al jefe de operaciones del área de la actividad.
- 2) Retirar en Mademet 9 recipientes para muestreo, ya lavados.
- 3) Se deben masar los recipientes sin tapa y rotularlos con plumón en Tabla 41, Figura 34.
- 4) Lavar cortador de muestras, como muestra la Figura 36.
- 5) Traslado a ubicación del estanque 6231-A, Figura 33.
- 6) Se comienza la toma de muestra de la siguiente manera:
  - a) Se debe registrar la hora en que se inicia el corte de las muestras. Tabla 40.
  - b) En la línea de descarga del espesador de colas 3, tomar muestra, cortando 3 veces (una ida, una vuelta y luego otra ida), tratando de abarcar todos los bordes del flujo e ir llenado el recipiente de corte, esto se debe repetir dos veces para completar una masa superior a los 2 [kg] en el balde contenedor de la muestra, Figura 38. *Es necesario alcanzar los 2 [kg] para disminuir variabilidades*
  - c) Se debe tener cuidado de realizar un corte que atraviese toda la descarga y en el que todas las partes del incremento entren en el cortador.
  - d) Se debe tratar de mantener una velocidad constante de cortado.
  - e) Además se puede verificar el peso de los baldes llevando una pesa a terreno
  - f) Una vez llenado, tapar el recipiente, verificando que no se derrame pulpa
- 7) Registrar la hora de finalización de la prueba

- 8) Traslado cuidadoso de los recipientes a Mademet de modo que no se derrame pulpa, si ocurrieran derrames se deben registrar en la Tabla 42. Figura 39.

### Tabla para contrastación de densímetro

Tabla 40: Tabla para el registro de actividad de corte de muestras en Dropbox A

Hora de inicio de corte de muestras	
Hora de finalización de corte de muestras	
Número de muestras	

Tabla 41: Registro para medición de porcentaje de sólido laboratorio

Muestra	Peso Balde sin tapa [gr]	Peso balde con pulpa sin tapa [gr]	Peso Pulpa [gr]	Peso Bandeja [gr]	Peso Bandeja + pulpa [gr]	Peso seco [gr]
M1						
M2						
M3						
M4						
M5						
M6						
M7						
M8						
M9						

Tabla 42: Registro en caso de derrame

Número de muestras derramadas	
Rotulo de muestra derramada	
Número de muestras Análisis	

### Tablas para prueba de contrastación de pesómetro

Tabla 43: Tabla para determinación de velocidad de la correa de forma manual

Hora de comienzo de toma de velocidad			
Hora de finalización toma de velocidad			
Medición	Distancia [m]	Tiempo [s]	Velocidad [m/hr]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
<b>Promedio</b>			

Tabla 44: Registro de horas en prueba contrastación pesómetro

Hora de inicio de lanzamiento de testigo	
Hora de detención de correa	
Hora finalización prueba	

Tabla 45: Flujo másico puntual de cada corte al pasar el testigo por pesómetro

Número de corte	Flujo másico puntual pesómetro [ton/hr]
3	
2	
1	

Tabla 46: Tabla para registro de masado de material correspondiente a un primer corte

Nº Bolsa	Masa bolsa [kg]	Masa bolsa con material [Kg]	Masa de material [Kg]
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
Masa total en un metro [Kg]			
Masa total en un metro [Ton]			

## ANEXO C: Anexos de Resultados

Distribuciones, límites del noventa por ciento de los datos más probables y prueba de hipótesis t

### Flujómetro de colas

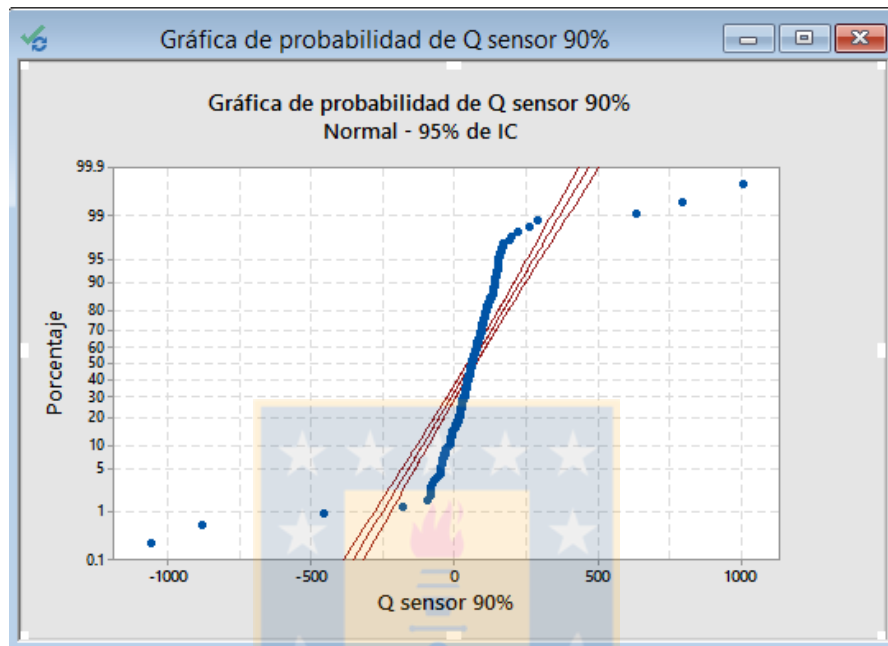


Figura 81: Comportamiento de los datos de flujo obtenidos por el sensor en una distribución normal, en prueba de contrastación flujómetro.

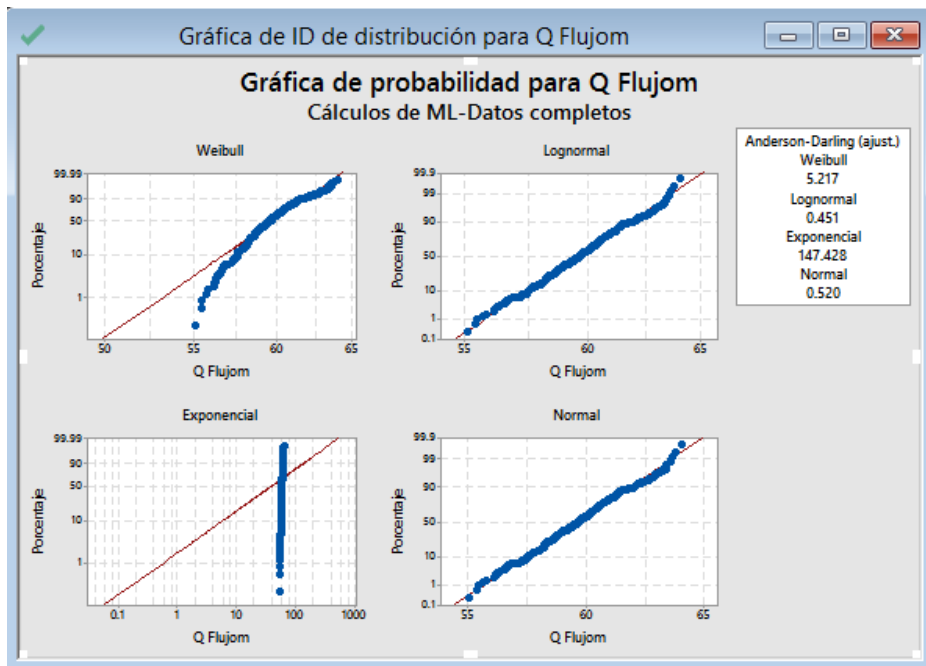


Figura 82: Ajuste de probabilidad de distribución para los datos extraídos del flujómetro

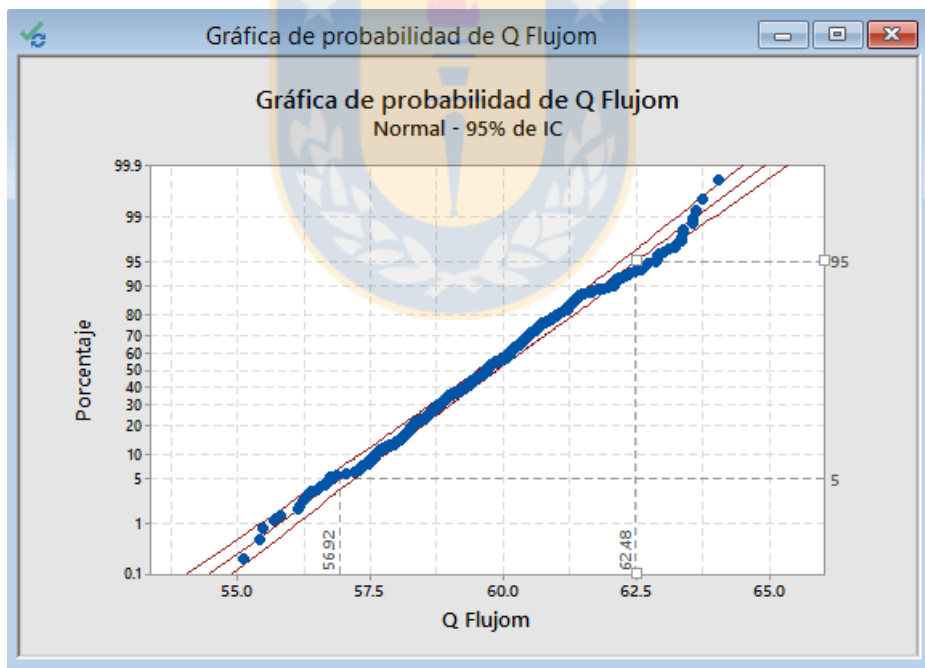


Figura 83: Ajuste a distribución normal de los datos del flujómetro y rango 90% más probable

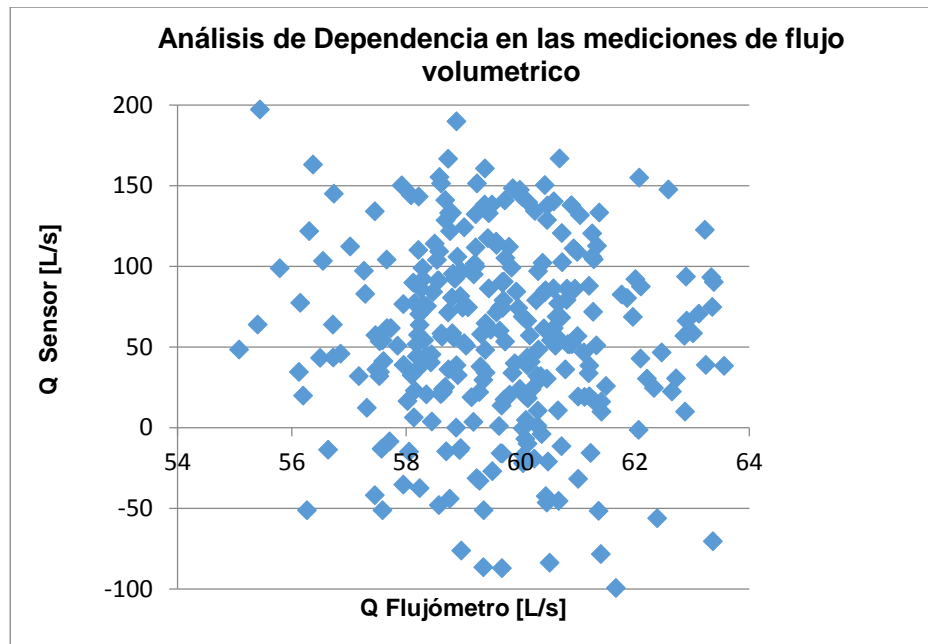


Figura 84: Nube de puntos para relación entre el flujo obtenido por sensor y el flujo

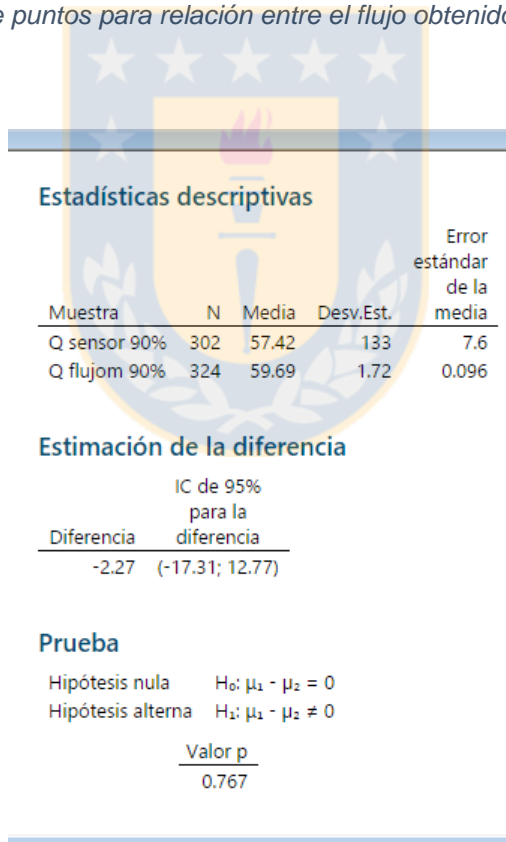


Figura 85: Resultado prueba de hipótesis t de comparación de dos medias independientes

## Mann-Whitney: Q sensor 90%;

### Método

$\eta_1$ : mediana de Q sensor 90%  
 $\eta_2$ : mediana de Q flujom 90%  
 Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Mediana
Q sensor 90%	302	57.4441
Q flujom 90%	324	59.6740

### Estimación de la diferencia

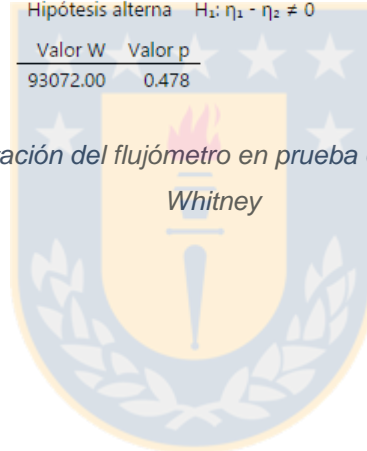
Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-2.03814	(-7.33293; 4.93833)	95.00%

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Valor W	Valor p
93072.00	0.478

Figura 86: Resultado de contrastación del flujómetro en prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-



Whitney



**Densímetro de colas**

**Distribuciones, límites del 90% de los datos más probables, dependencia y prueba de hipótesis en análisis del densímetro de colas para 17 de Agosto**

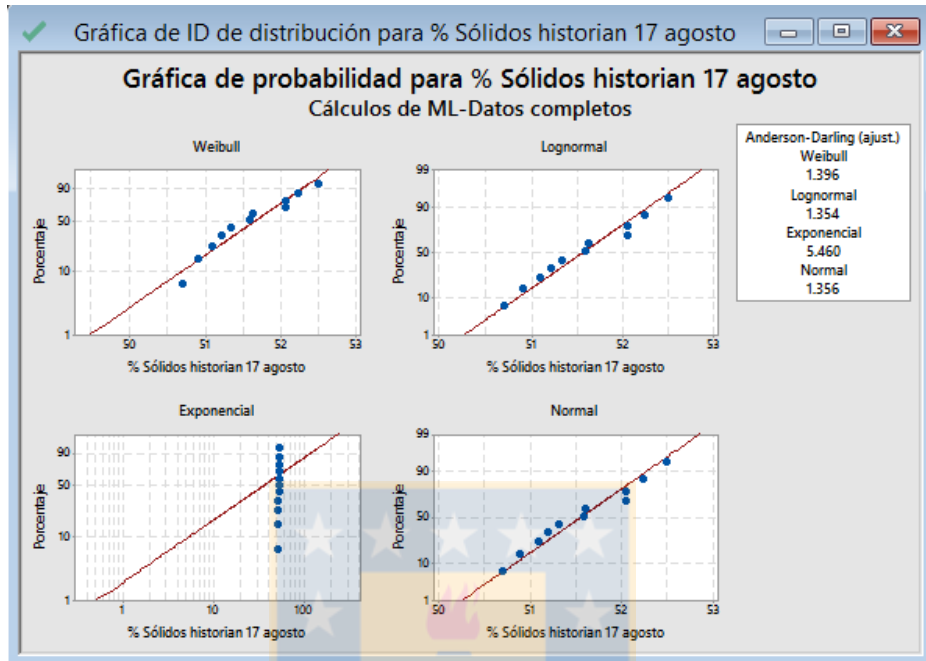


Figura 87: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido del historian del densímetro en prueba del 17 de Agosto.

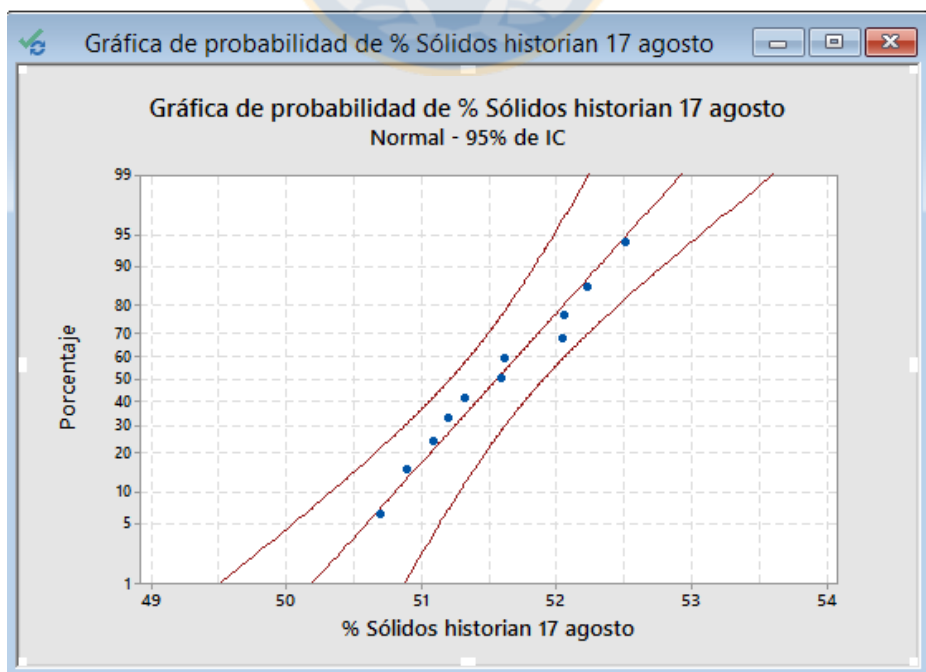


Figura 88: Comportamiento de los datos del densímetro frente a distribución normal.

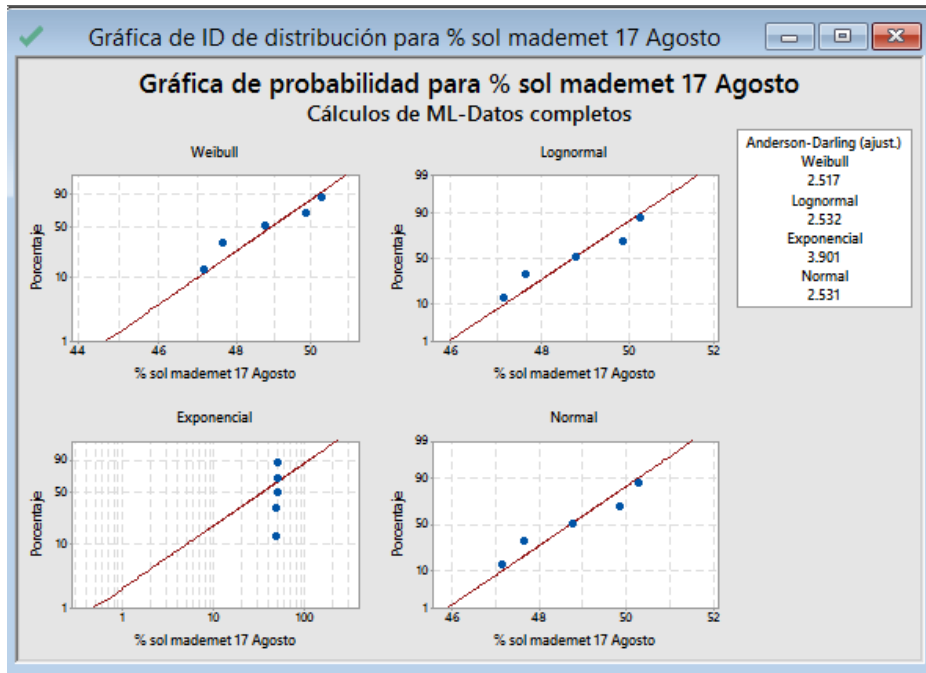


Figura 89: Ajuste de probabilidad para los datos cortados y analizados en laboratorio en prueba 17 de Agosto.

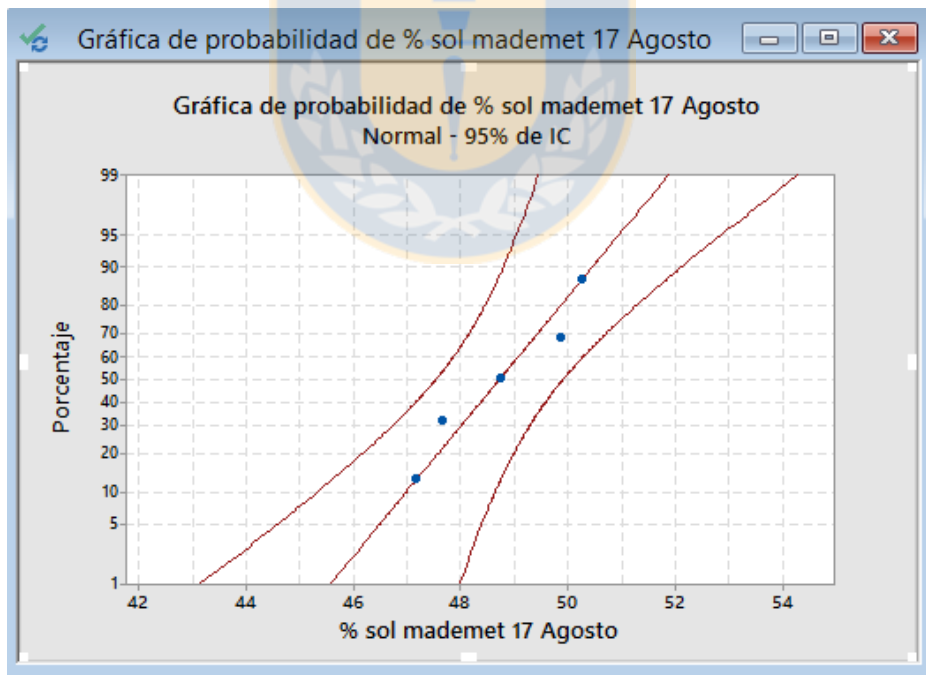


Figura 90: Ajuste a distribución normal de los datos de laboratorio en prueba de contrastación de densímetro para el 17 de Agosto.

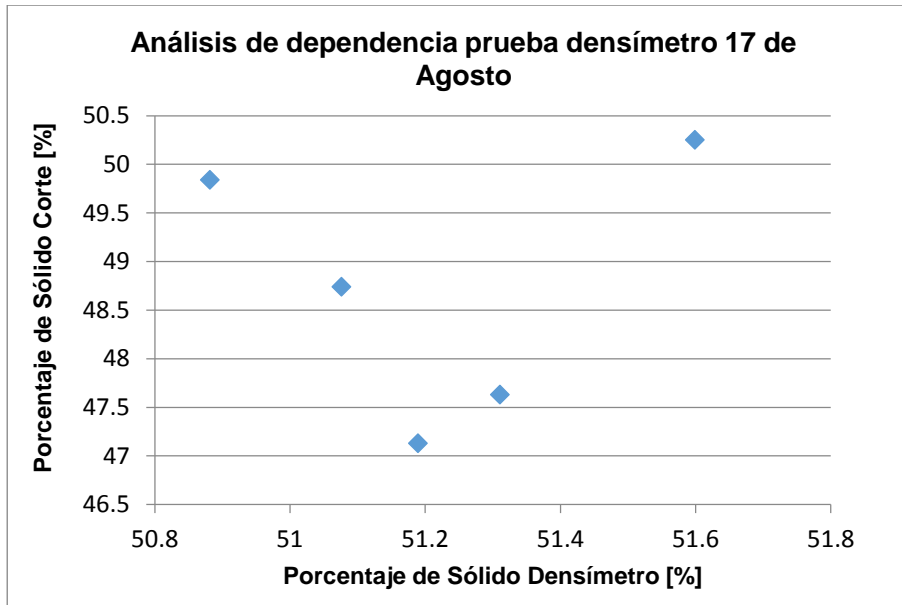


Figura 91: Nube de puntos para relación entre porcentaje de sólido del densímetro y porcentaje de sólido de laboratorio, indicando la no dependencia.

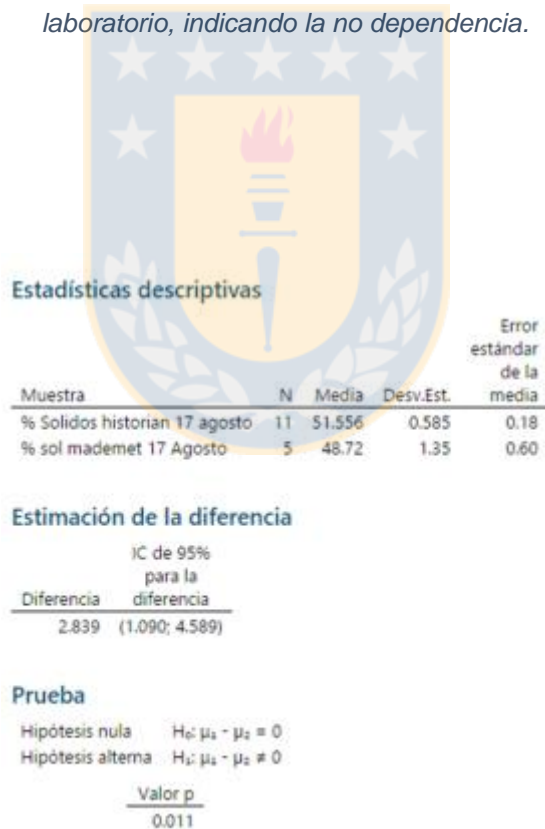


Figura 92: Resultados prueba de hipótesis t de comparación de medias para contrastación de densímetro el 17 el Agosto.

## Mann-Whitney: % sol mademet 17 Agosto;

### Método

$\eta_1$ : mediana de % sol mademet 17 Agosto  
 $\eta_2$ : mediana de % Sólidos historian 17 agosto  
 Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

### Estadísticas descriptivas

	Muestra	N	Mediana
% sol mademet 17 Agosto	5		48.74
% Sólidos historian 17 agosto	11		51.57

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-2.84	(-4.40876; -1.34821)	95.86%

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Valor W	Valor p
15.00	0.002

Figura 93: Resultado prueba de hipótesis de Mann-Whitney para prueba contrastación de densímetro el 17 de Agosto.

**Distribuciones, límites del 90% de los datos más probables, dependencia y prueba de hipótesis en análisis del densímetro de colas para el 24 de Agosto**

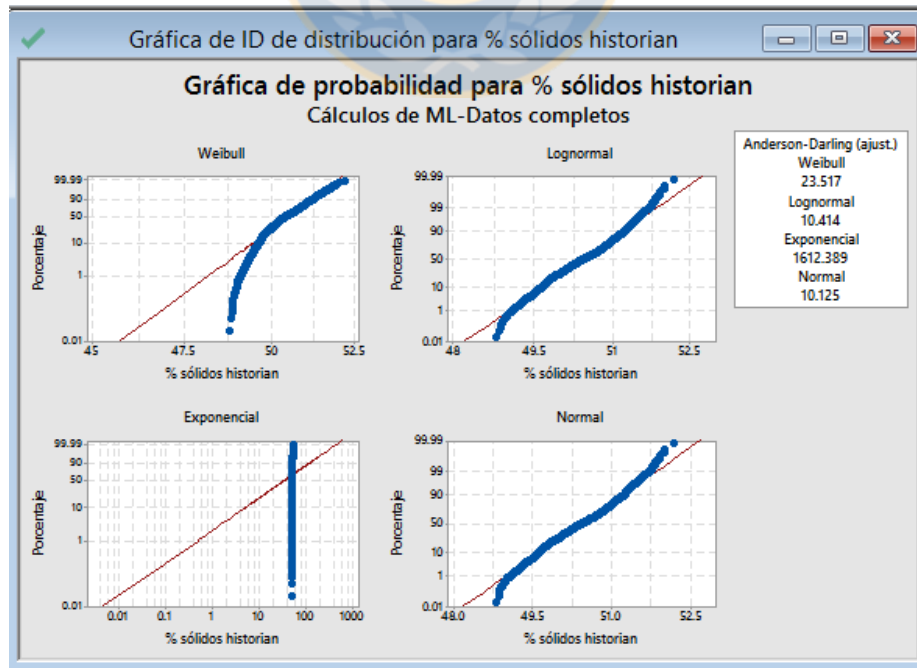


Figura 94: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido del historian de densímetro en prueba del 24 de Agosto.

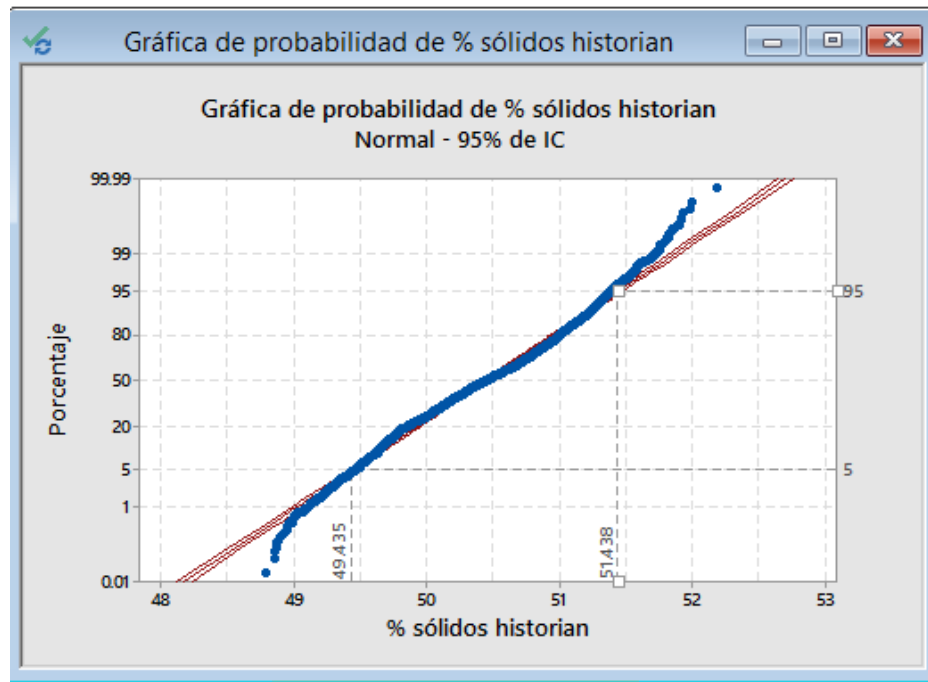


Figura 95: Ajuste a distribución normal de los datos de laboratorio en prueba de contrastación de densímetro y noventa por ciento más probable para el 24 de Agosto.

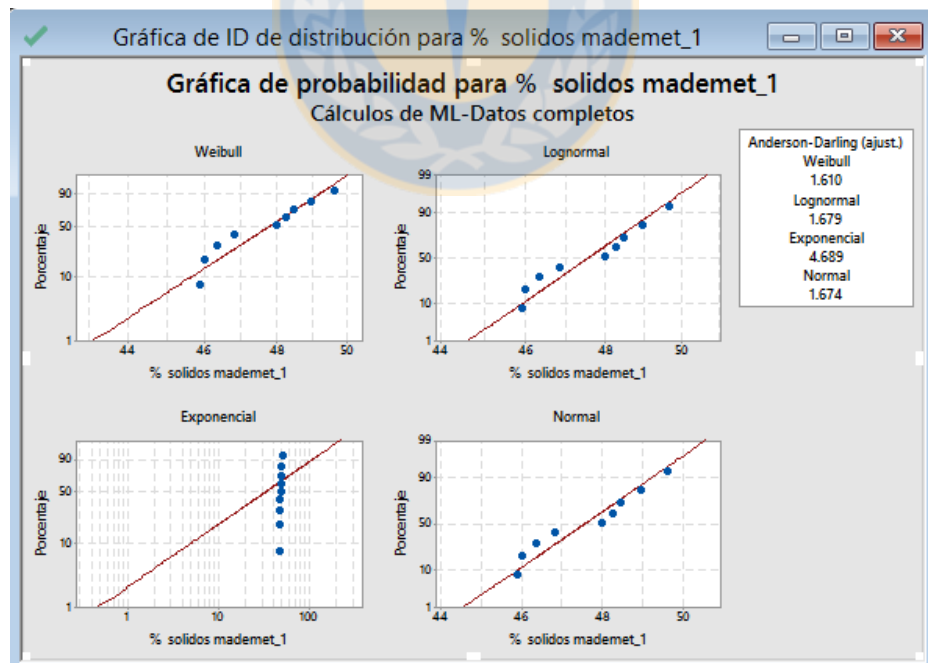


Figura 96: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio en prueba del 24 de Agosto.

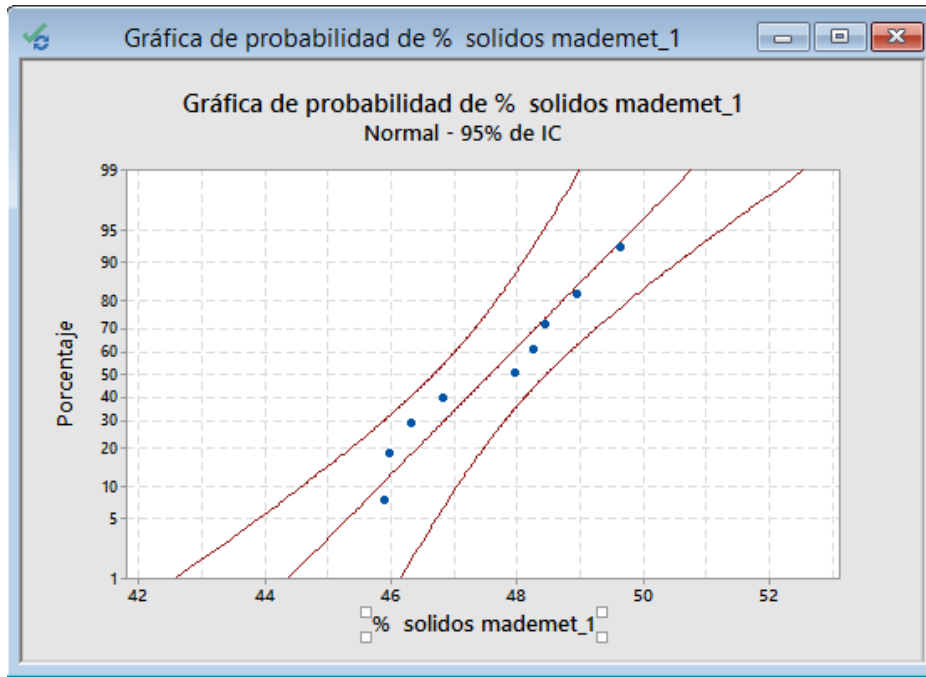


Figura 97: Ajuste normal de los datos entregados por laboratorio para el día 24 de Agosto 2018.

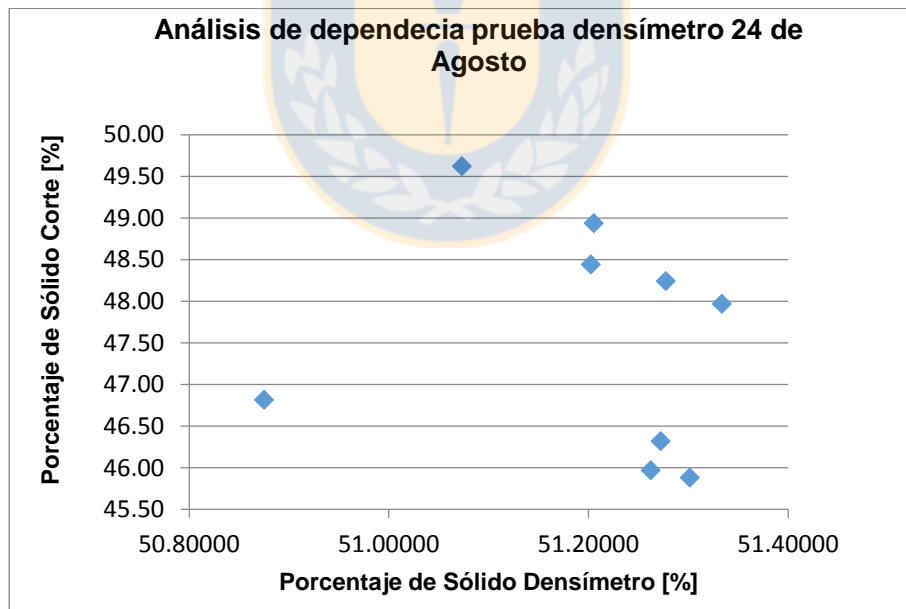


Figura 98: Nube de puntos de no dependencia entre datos de porcentaje de sólido de densímetro y prueba en día 24 de Agosto.

### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
% solidos mademet_1	9	47.58	1.37	0.46
% sólidos filtrados	3302	50.448	0.521	0.0091

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-2.872	(-3.924; -1.820)

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor p  
0.000

Figura 99: Resultados prueba de hipótesis t de comparación de medias para contrastación de densímetro el 24 el Agosto.

### Mann-Whitney: % solidos mademet\_1;

#### Método

$\eta_1$ : mediana de % solidos mademet\_1  
 $\eta_2$ : mediana de % sólidos filtrados  
 Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

#### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Mediana
% solidos mademet_1	9	47.97
% sólidos filtrados	3302	50.46

#### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-2.79	(-3.84845; -1.96814)	95.00%

#### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	208.00	0.000
Ajustado para empates	208.00	0.000

Figura 100: Resultado prueba de hipótesis de Mann-Whitney para prueba contrastación de densímetro el 24 de Agosto.

**Distribuciones, límites dentro del noventa por ciento más probable, dependencia y resultados prueba de hipótesis 7 de Septiembre**

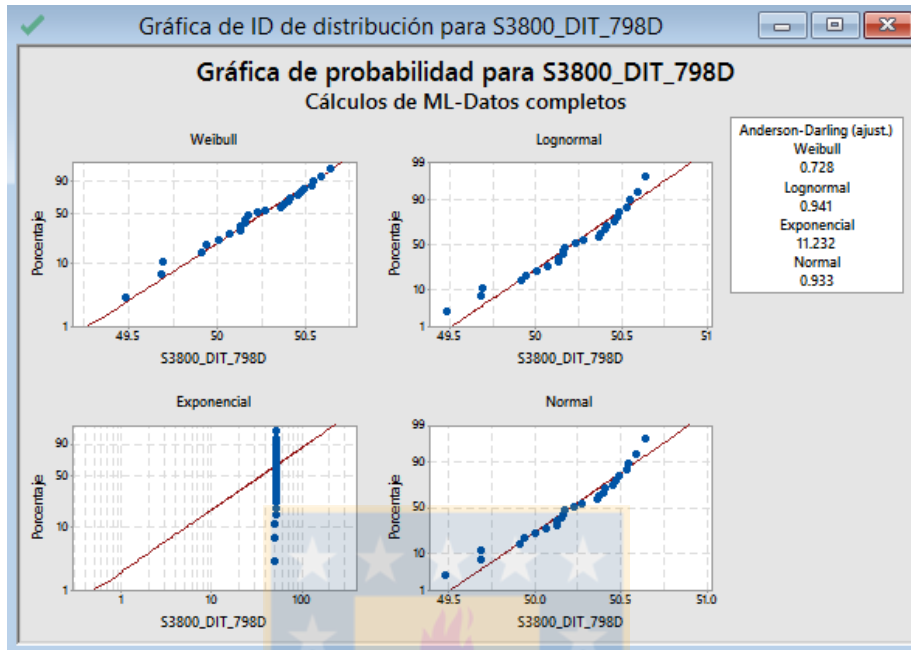


Figura 101: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido del densímetro en prueba del 7 de Septiembre.

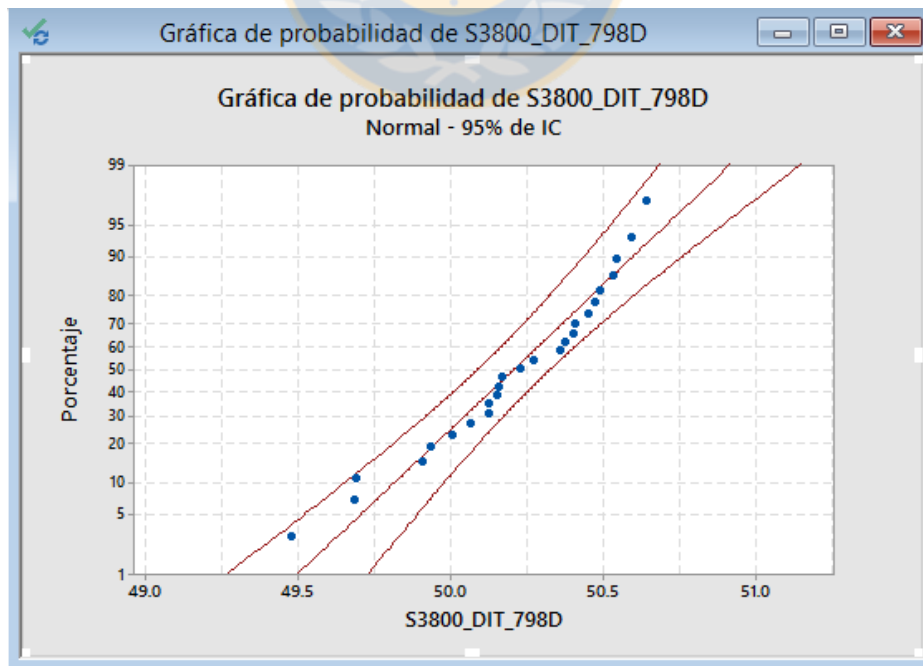


Figura 102: Ajuste a distribución normal de los datos de porcentaje de sólido del densímetro en prueba del 7 de Septiembre.



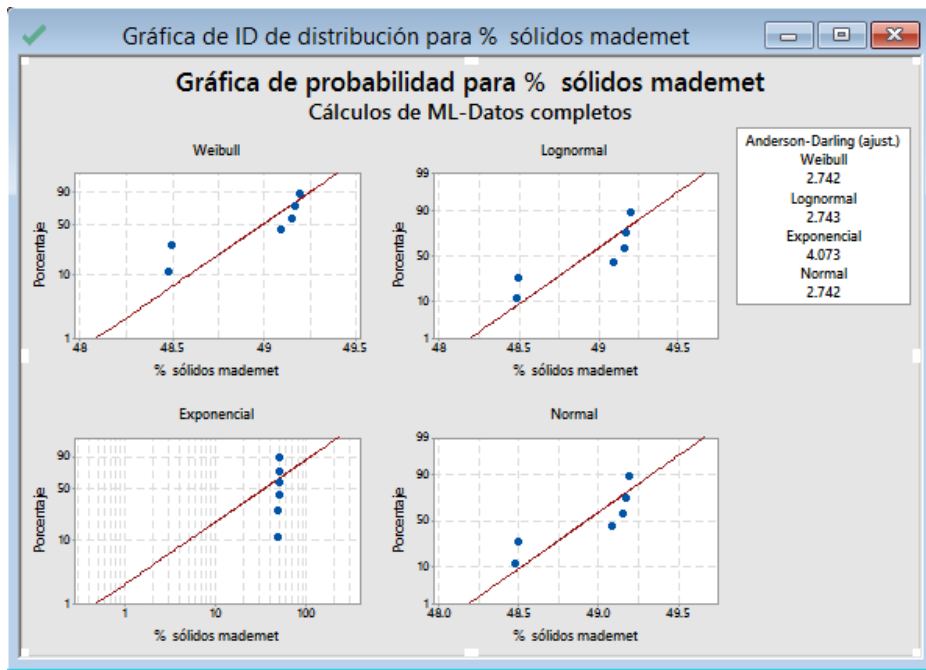


Figura 103: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio en prueba del 7 de Septiembre.

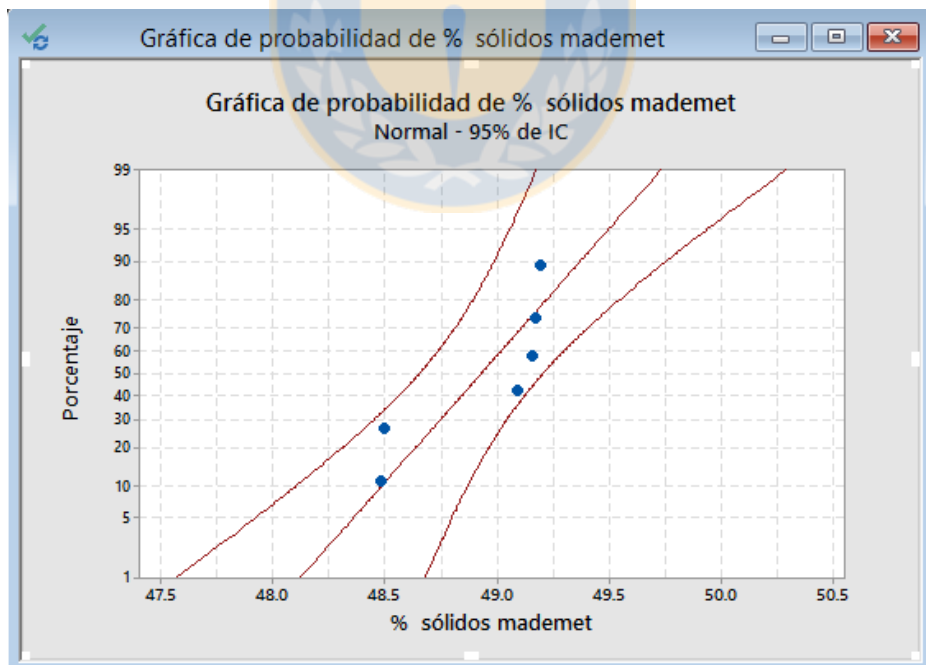


Figura 104: Ajuste a distribución normal de los datos de laboratorio en prueba de contrastación de densímetro para el 7 de Septiembre.

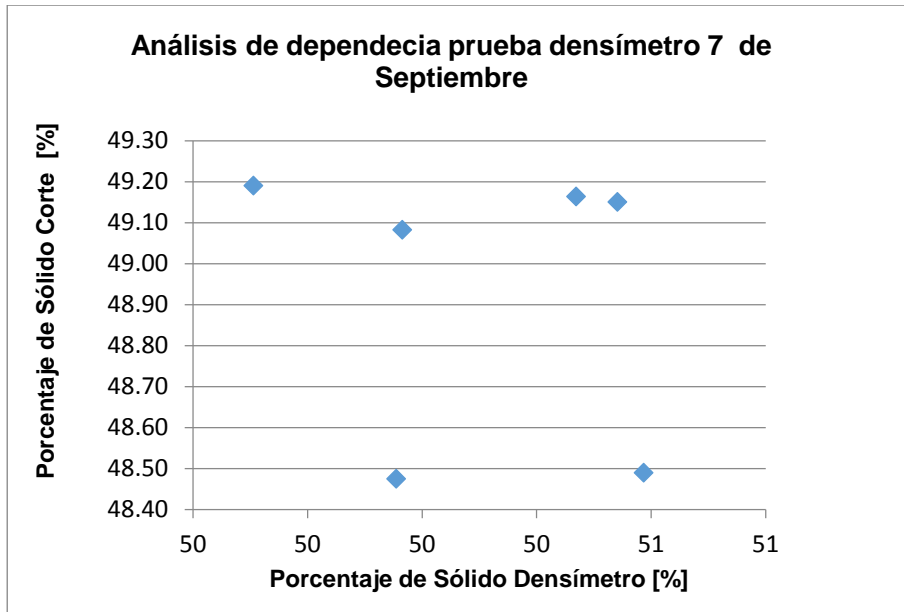


Figura 105: Gráfica relación entre los porcentajes de sólido del densímetro y datos de laboratorio en prueba de contrastación 7 de septiembre.



Figura 106: Prueba de hipótesis t de dos muestras para contrastación del densímetro el 7 de Septiembre.

## Mann-Whitney: % sólidos mademet;

### Método

$\eta_1$ : mediana de % sólidos mademet

$\eta_2$ : mediana de S3800\_DIT\_798D

Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

### Estadísticas descriptivas

	Muestra	N	Mediana
% sólidos mademet	6		49.12
S3800_DIT_798D	25		50.23

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-1.27	(-1.63280; -0.975770)	95.17%

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Valor W	Valor p
21.00	0.000

Figura 107: Resultados Prueba de Mann-Whitney de comparación de medias para contrastación densímetro el 7 de Septiembre.

## Distribuciones, límites, dependencias y prueba de comparación de medias para análisis densímetro de colas 14 de Septiembre

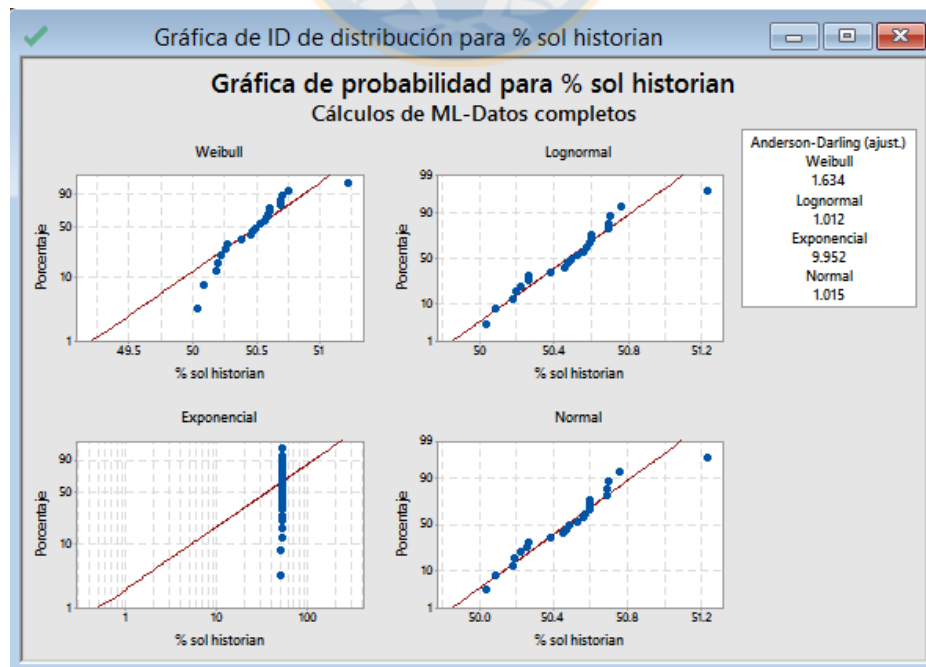


Figura 108: Gráfica de probabilidad de ajuste de distribución para los datos de porcentaje de sólido del densímetro para prueba del 14 de Septiembre.

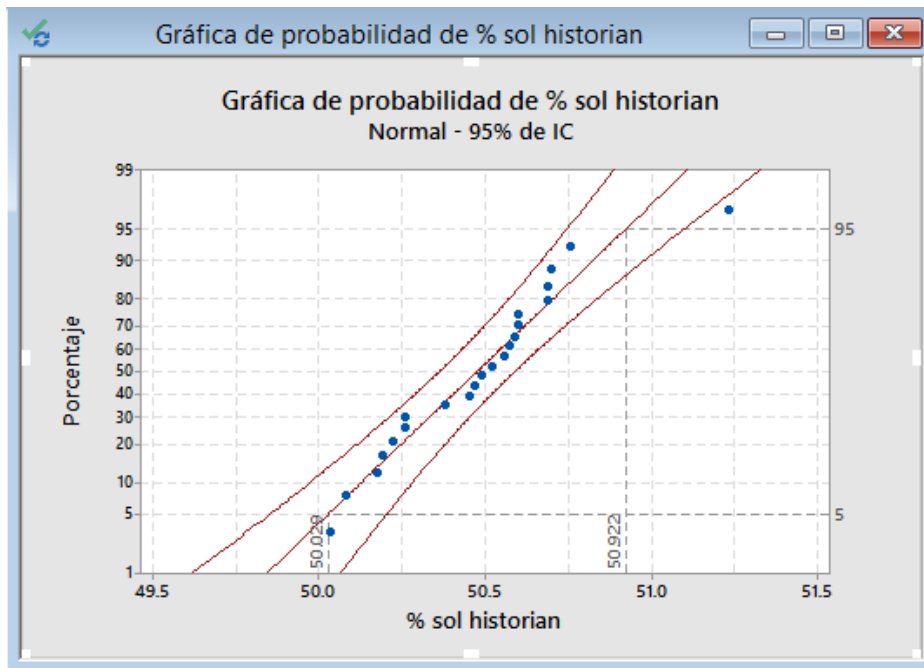


Figura 109: Ajuste de probabilidad Normal para los datos del densímetro en prueba del 14 de Septiembre.

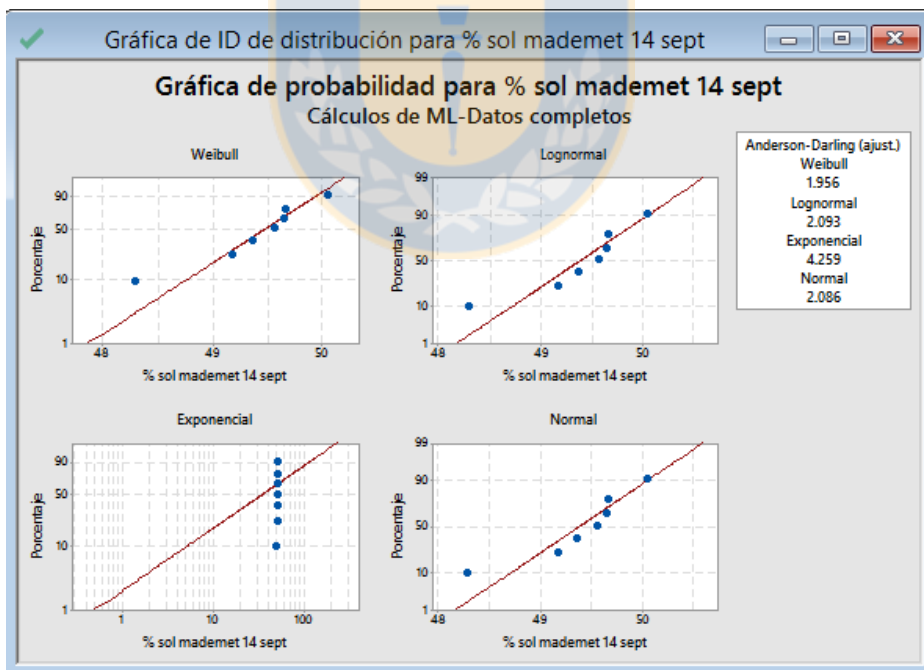


Figura 110: Gráfica de probabilidad de ajuste de distribución para los datos de porcentajes de sólidos cortados y analizados en laboratorio para prueba del 14 de Septiembre

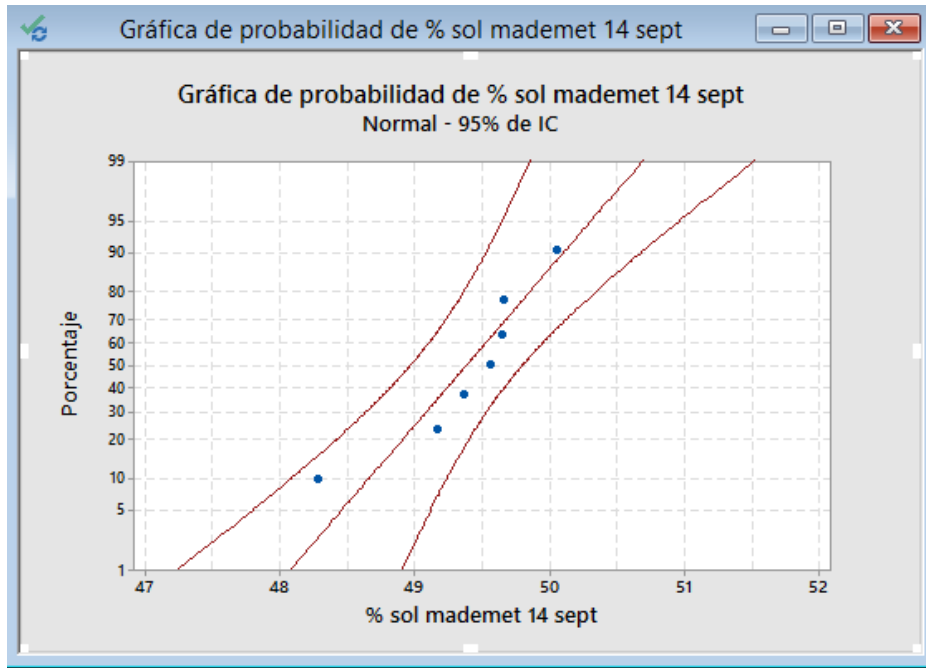


Figura 111: Gráfica de comportamiento de datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio dentro de una distribución normal para el 14 de Septiembre.

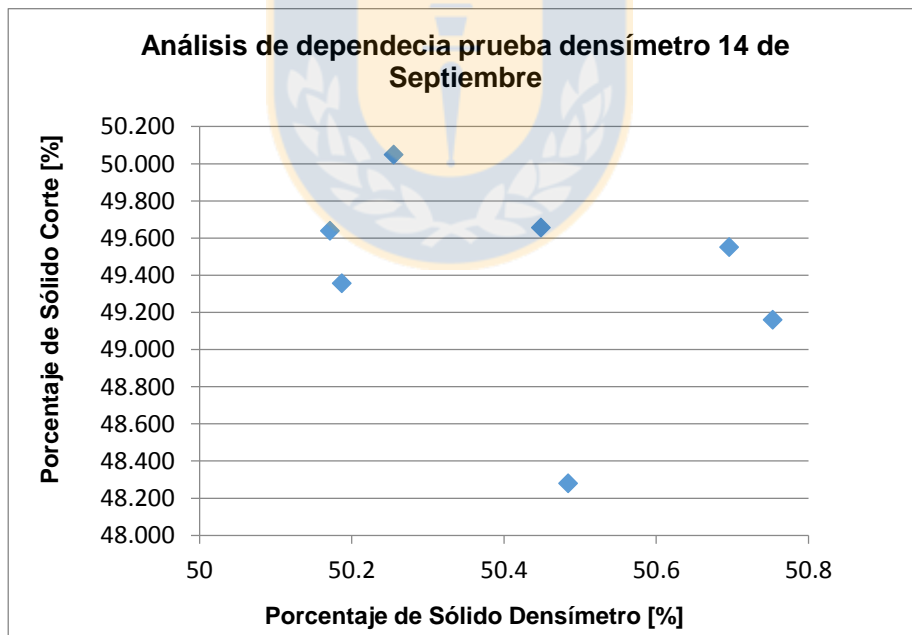


Figura 112: Gráfica de análisis de dependencia entre porcentaje de sólido de densímetro y porcentajes de sólidos entregados por laboratorio para prueba de 14 de Septiembre.

### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
% sol mademet 14 sept	7	49.384	0.560	0.21
% sol hist filtrado 14 sept	21	50.439	0.218	0.048

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-1.055	(-1.586; -0.525)

### Prueba

Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$
Valor p	0.003

Figura 113: Resultados prueba de hipótesis t de comparación de medias para contrastación de densímetro el 14 de Septiembre.

### Mann-Whitney: % sol mademet 14 sept;

#### Método

$\eta_1$ : mediana de % sol mademet 14 sept  
 $\eta_2$ : mediana de % sol hist filtrado 14 sept  
 Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

#### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Mediana
% sol mademet 14 sept	7	49.55
% sol hist filtrado 14 sept	21	50.48

#### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-0.96	(-1.31; -0.64)	95.04%

#### Prueba

Hipótesis nula	$H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$
Hipótesis alterna	$H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$
Valor W	29.00
Valor p	0.000

Figura 114: Resultado prueba de hipótesis de Mann-Whitney para prueba contrastación de densímetro el 14 de Septiembre.

Distribuciones, límites dentro del noventa por ciento más confiable y dependencia para el análisis de densímetro el 21 de Septiembre

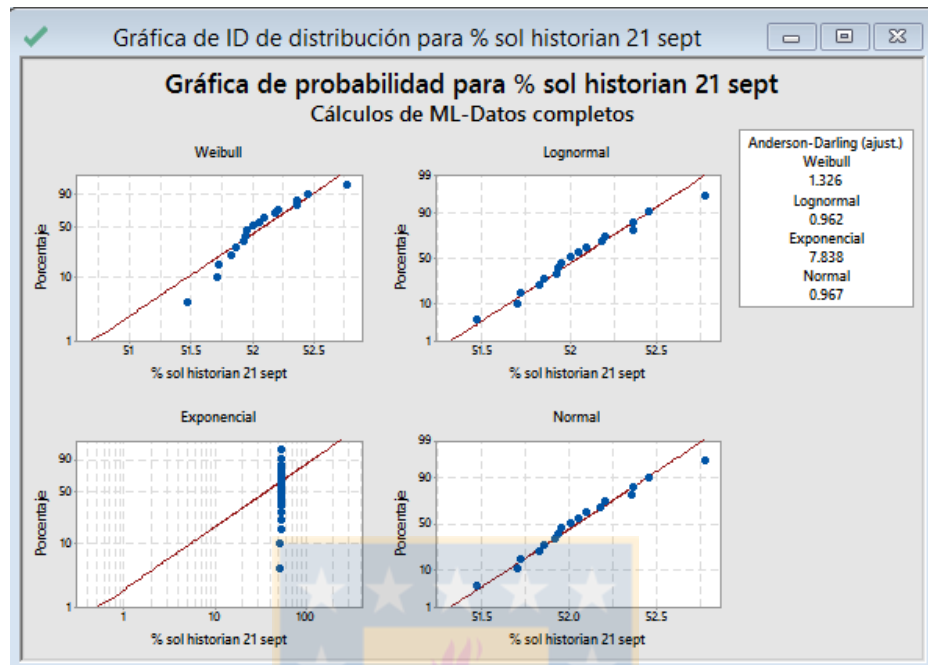


Figura 115: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido del historian de densímetro en prueba del 21 de Septiembre.

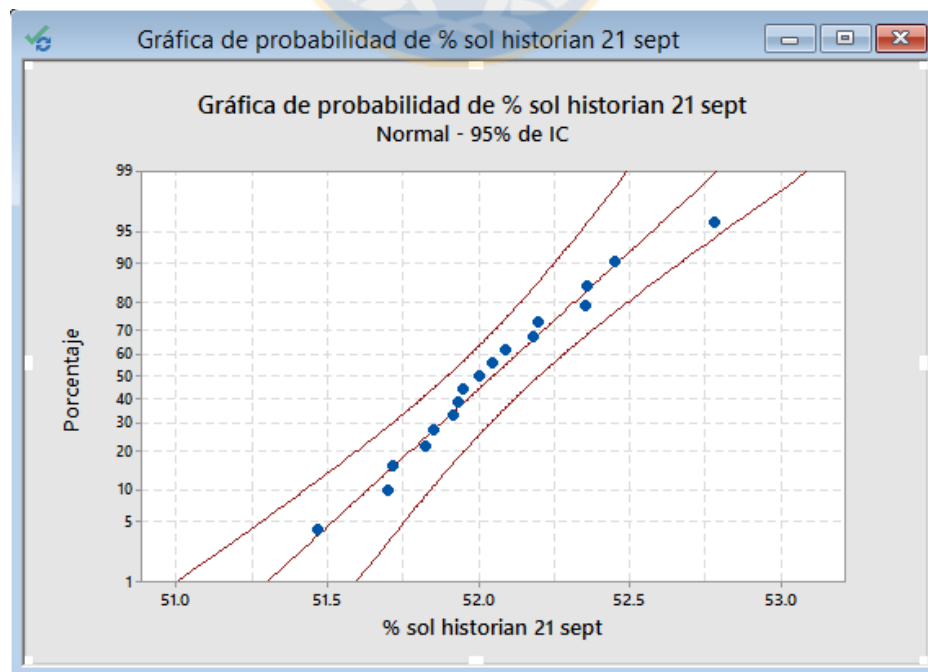


Figura 116: Ajuste de probabilidad Normal para los datos del densímetro en prueba del 21 de Septiembre.

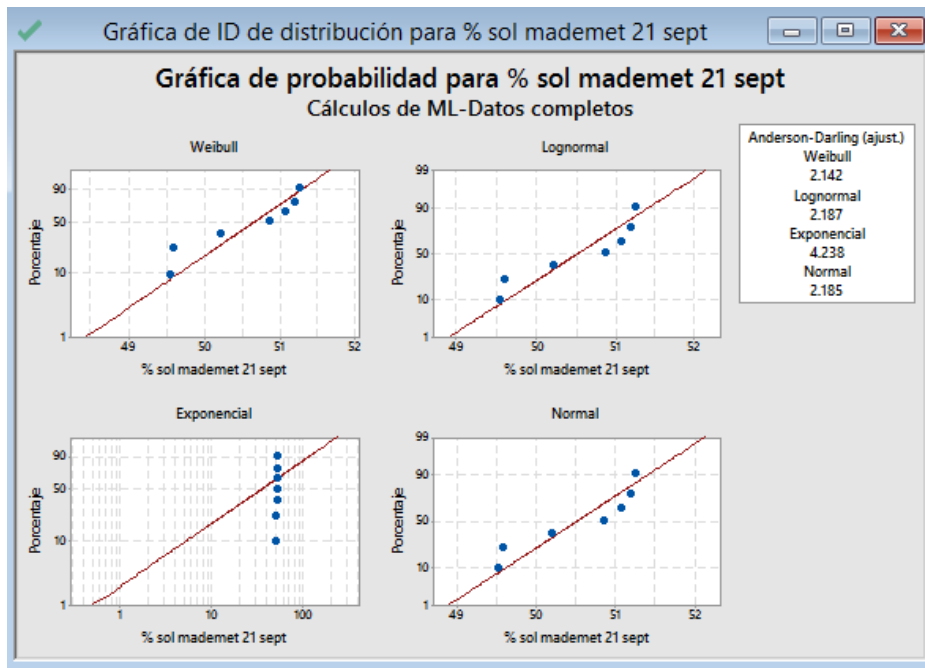


Figura 117: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio en prueba del 21 de Septiembre.

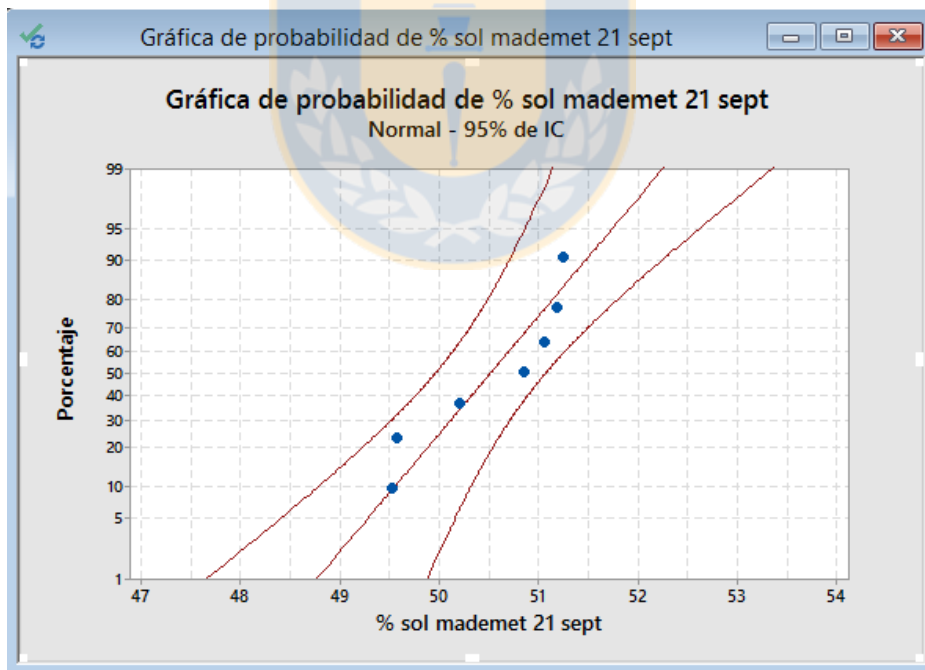


Figura 118: Ajuste de probabilidad Normal para los datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio en prueba del 21 de Septiembre



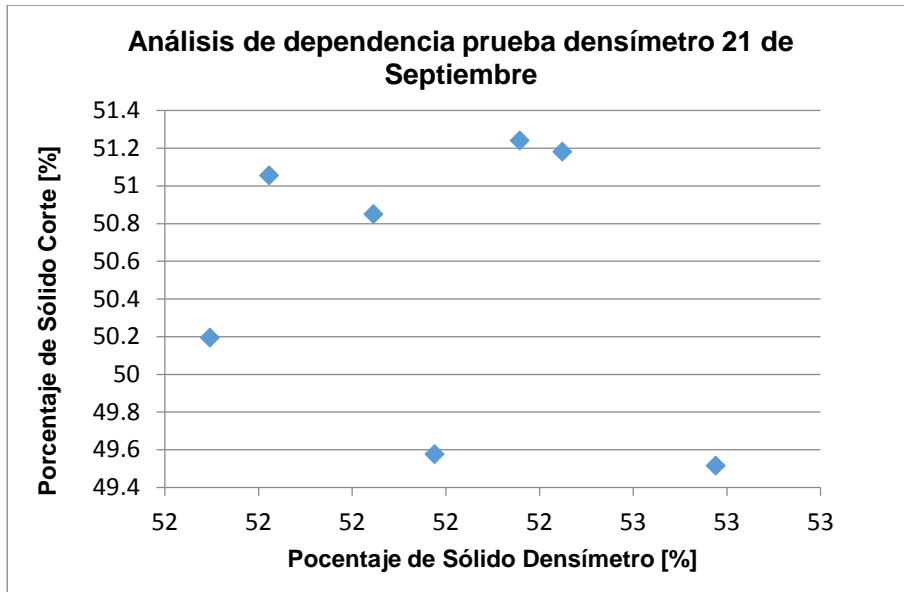


Figura 119: Gráfica de análisis de dependencia entre los datos de porcentaje de sólido de densímetro y laboratorio en prueba del 21 de Septiembre

Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
% sol mademet 21 sept	7	50,516	0,748	0,28
% sol historian 21 sept	17	52,047	0,319	0,077

Estimación de la diferencia

Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-1.531	(-2.248; -0.814)

Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor p  
0.002

Figura 120: Resultados prueba de hipótesis t de comparación de medias para contrastación de densímetro el 21 de Septiembre.

## Mann-Whitney: % sol mademet 21 sept;

### Método

$\eta_1$ : mediana de % sol mademet 21 sept

$\eta_2$ : mediana de % sol historian 21 sept

Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

### Estadísticas descriptivas

	Muestra	N	Mediana
% sol mademet 21 sept	7	7	50.8491
% sol historian 21 sept	17	17	51.9986

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-1.32771	(-2.25590; -0.865520)	95.10%

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Valor W	Valor p
28.00	0.000

Figura 121: Resultado prueba de hipótesis de Mann-Whitney para prueba contrastación de densímetro el 21 de Septiembre.



## Distribuciones, límites dentro del noventa por ciento más probables y dependencia en el análisis de la prueba de densímetro del 28 de Septiembre

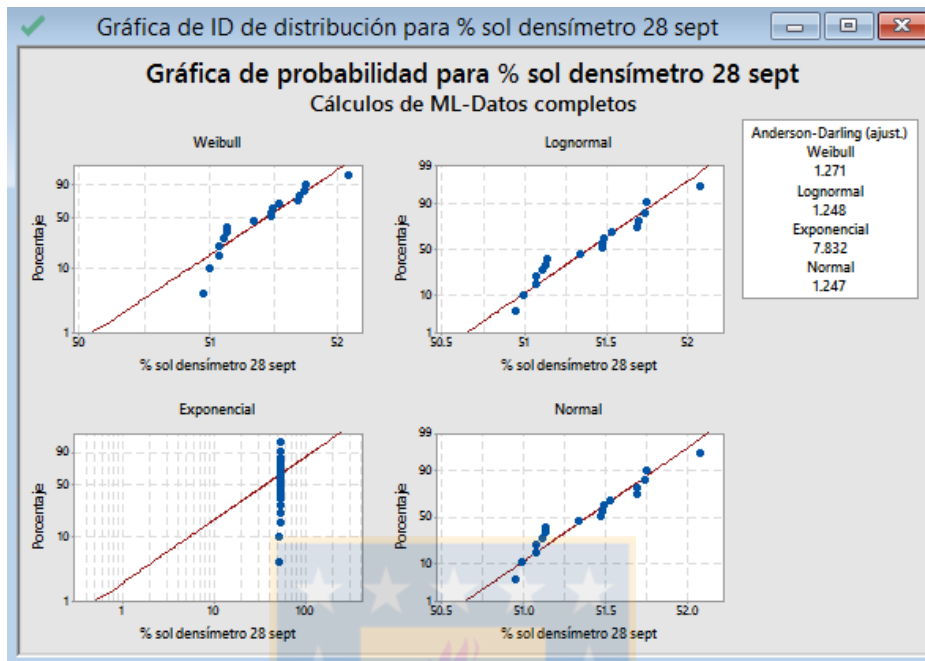


Figura 122: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido del historial de densímetro en prueba del 28 de Septiembre.

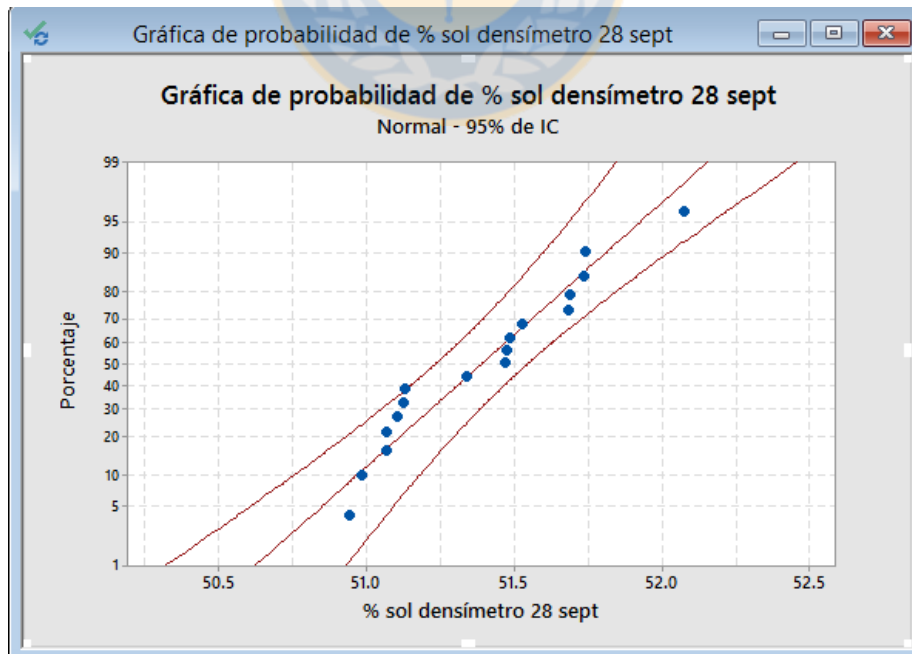


Figura 123: Ajuste de probabilidad Normal para los datos del densímetro en prueba del 28 de Septiembre.

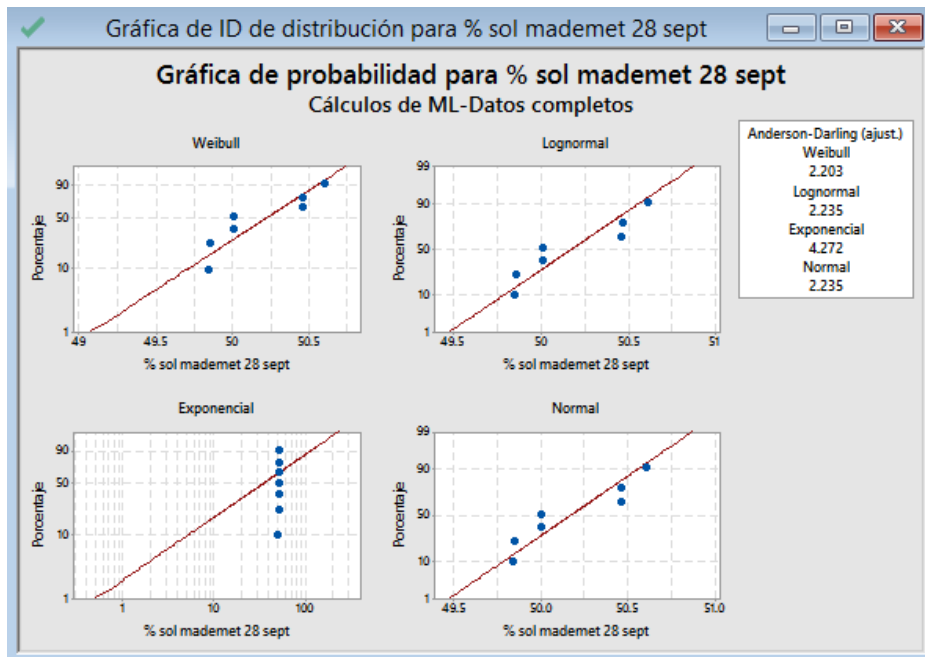


Figura 124: Gráfica de ajuste de probabilidad para los datos de porcentaje de sólido entregados por laboratorio en prueba del 28 de Septiembre.

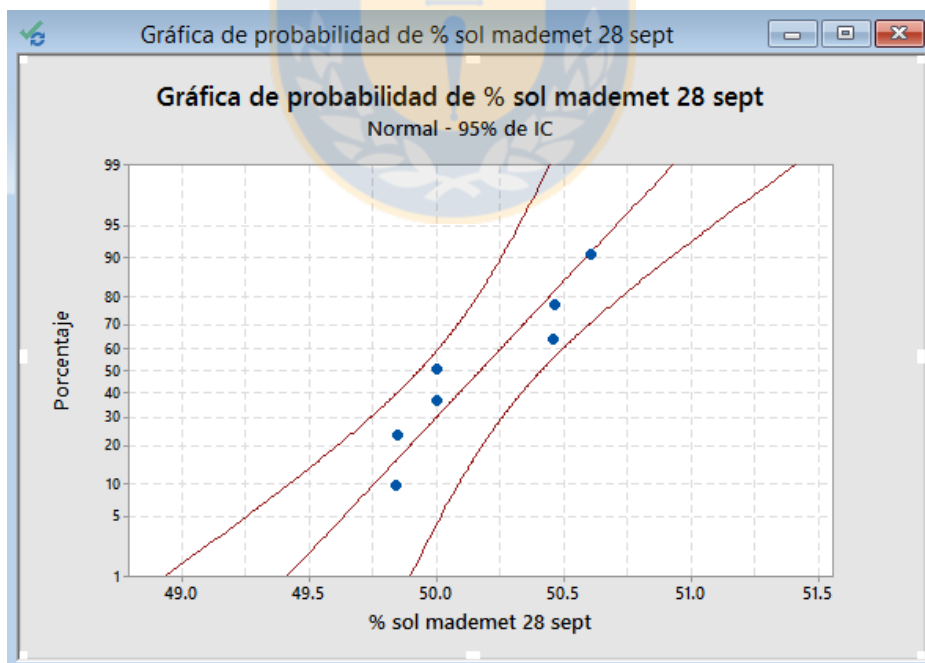


Figura 125: Ajuste de probabilidad Normal para los datos de porcentaje de sólido entregados por el densímetro en prueba del 14 de Septiembre

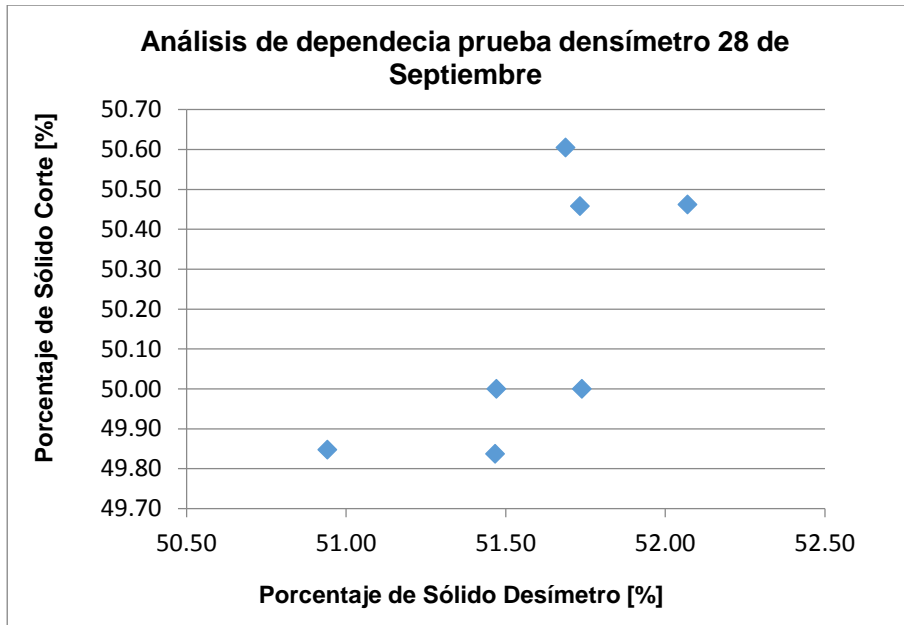


Figura 126: Gráfica de análisis de dependencia entre los datos de porcentaje de sólido de densímetro y laboratorio en prueba del 28 de Septiembre.

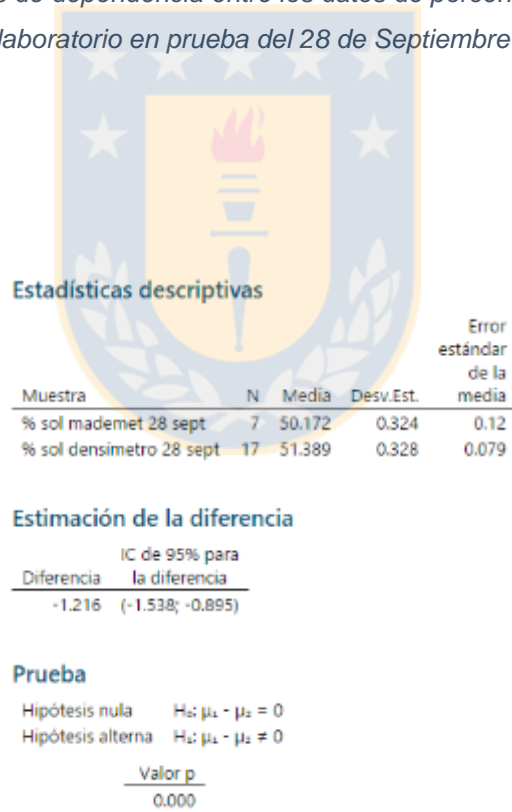


Figura 127: Resultados prueba de hipótesis t de comparación de medias para contrastación de densímetro el 28 de Septiembre.

## Mann-Whitney: % sol mademet 28 sept;

### Método

$\eta_1$ : mediana de % sol mademet 28 sept  
 $\eta_2$ : mediana de % sol densímetro 28 sept  
 Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

### Estadísticas descriptivas

	Muestra	N	Mediana
% sol mademet 28 sept	7		50.000
% sol densímetro 28 sept	17		51.468

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-1.21991	(-1.61368; -0.942)	95.10%

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	28.00	0.000
Ajustado para empates	28.00	0.000

Figura 128: Resultado prueba de hipótesis de Mann-Whitney para prueba contrastación de densímetro el 28 de Septiembre

Tabla 47: Resumen prueba Mann-Whitney en densímetro

Instrumento	Fecha	Diferencia con respecto a Mademet	% De diferencia	Prueba de Hipótesis Mann-Whitney	P
<b>Densímetro DIT 798D</b>	17 de Agosto	-2.84	-5.83	Se rechaza	0.00
	24 de Agosto	-2.76	-5.75	Se rechaza	0.00
	07 de Sept	-1.27	-2.59	Se rechaza	0.00
	14 de Sept	-0.95	-1.92	Se rechaza	0.00
	21 de Sept	-1.33	-2.61	Se rechaza	0.00
	28 de Sept	-1.22	-2.43	Se rechaza	0.00
<b>Promedio</b>		<b>-1.73</b>	<b>-3.52</b>	<b>Se rechaza</b>	<b>0.00</b>

## Pesómetros

Distribuciones, límites del 90% de los datos más probables y prueba de hipótesis t para Molino 4

Distribuciones, límites del 90% de los datos más probables y prueba de hipótesis t en análisis del 16 de Noviembre para Molino 4

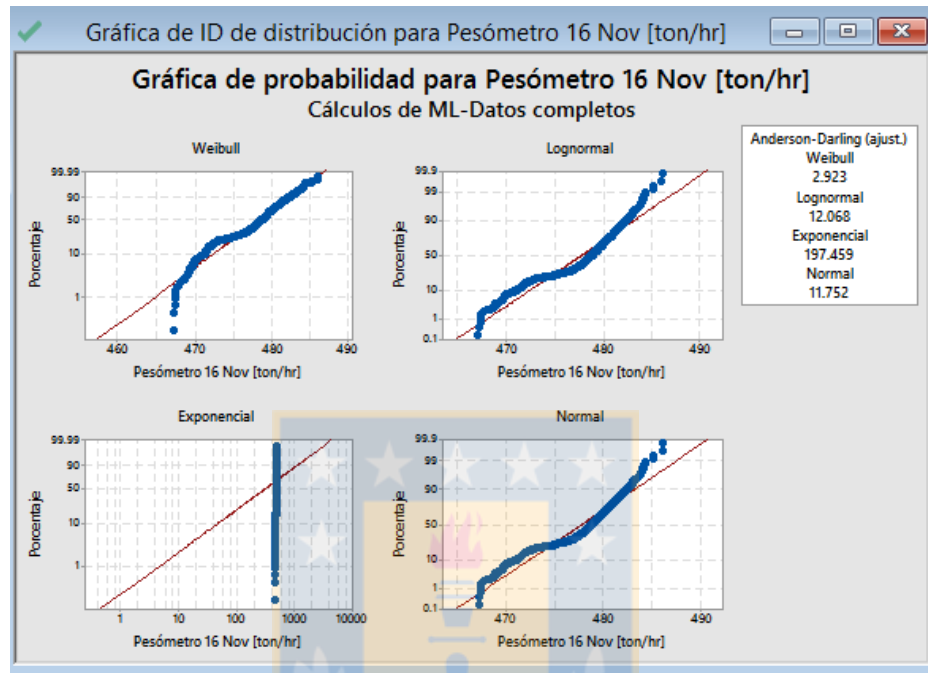


Figura 129: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico de comportamiento más estable y cercano a los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 4, para el día 16 de Noviembre.

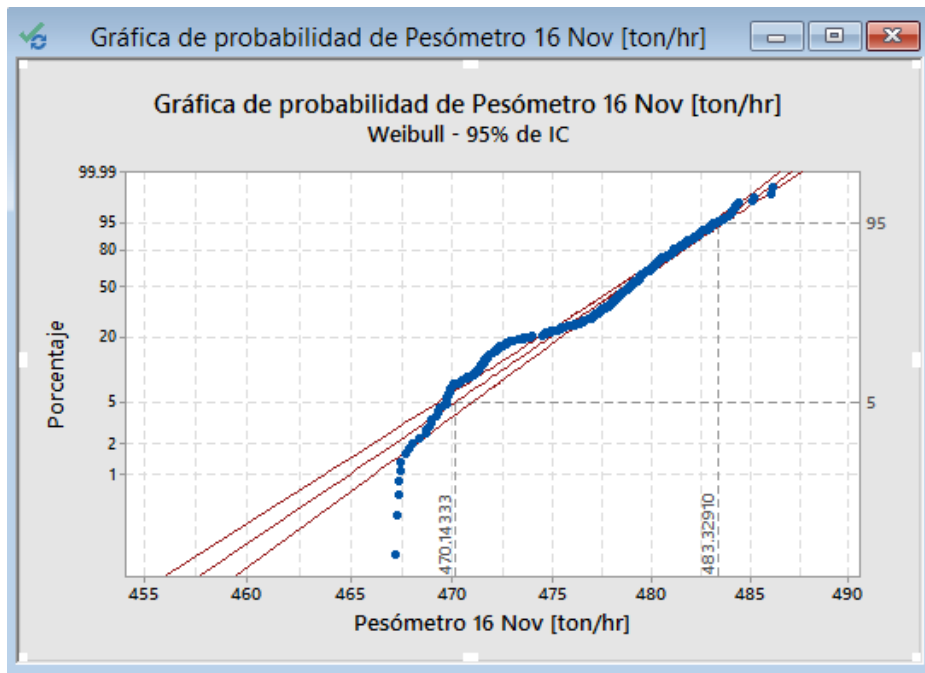


Figura 130: Gráfica de la distribución con mejor ajuste y límites de flujo másico para el noventa por ciento de los datos más probables del pesómetro de alimentación a molino 4, durante la prueba de contrastación del 16 de Noviembre

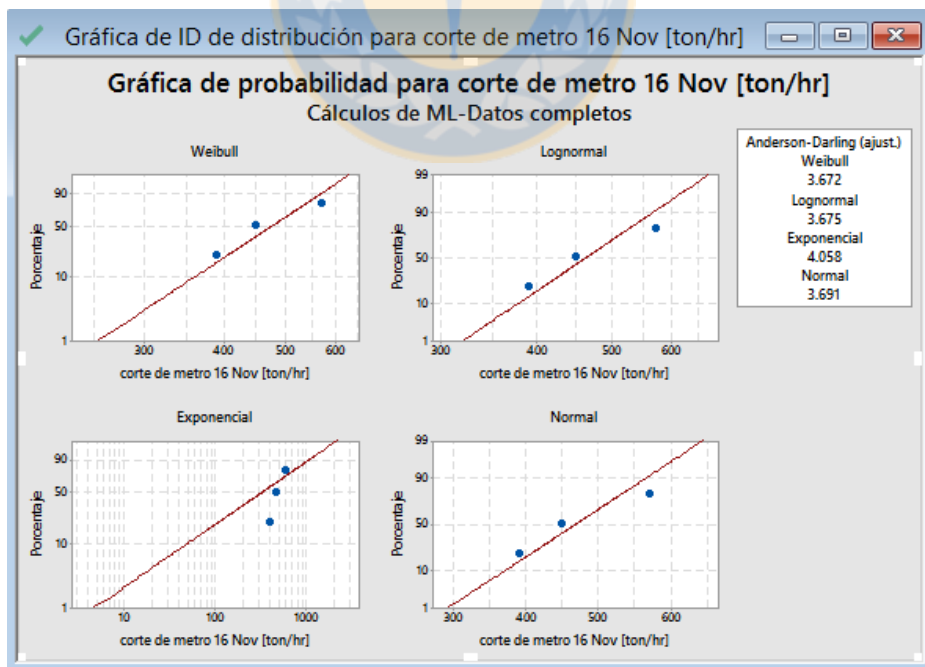


Figura 131: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 4, para el día 16 de Noviembre.



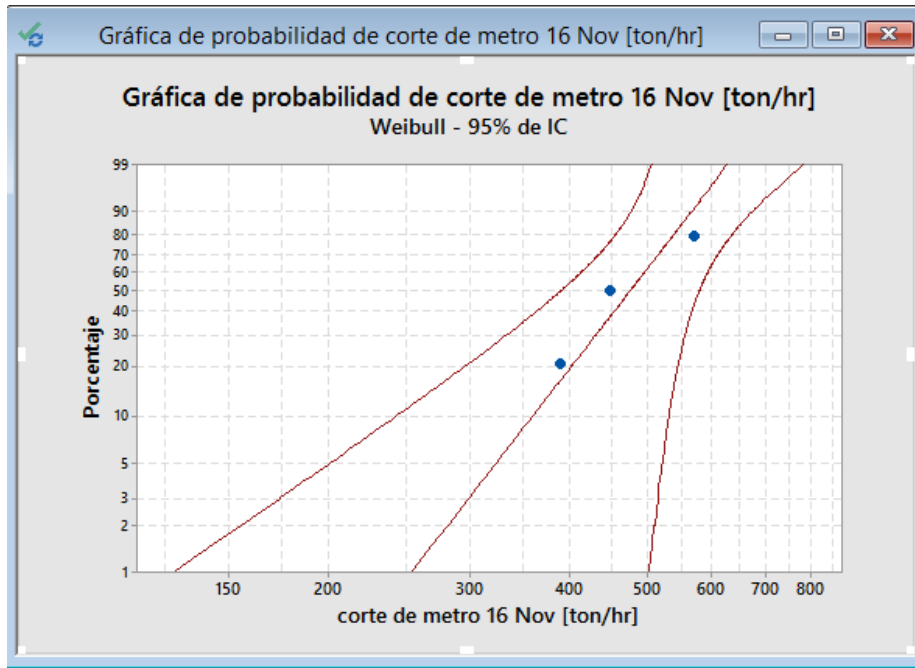


Figura 132: Gráfica de probabilidad de distribución weibull para los datos de flujos máxicos provenientes de los cortes de la prueba del 16 de Noviembre en pesómetro molino 4.

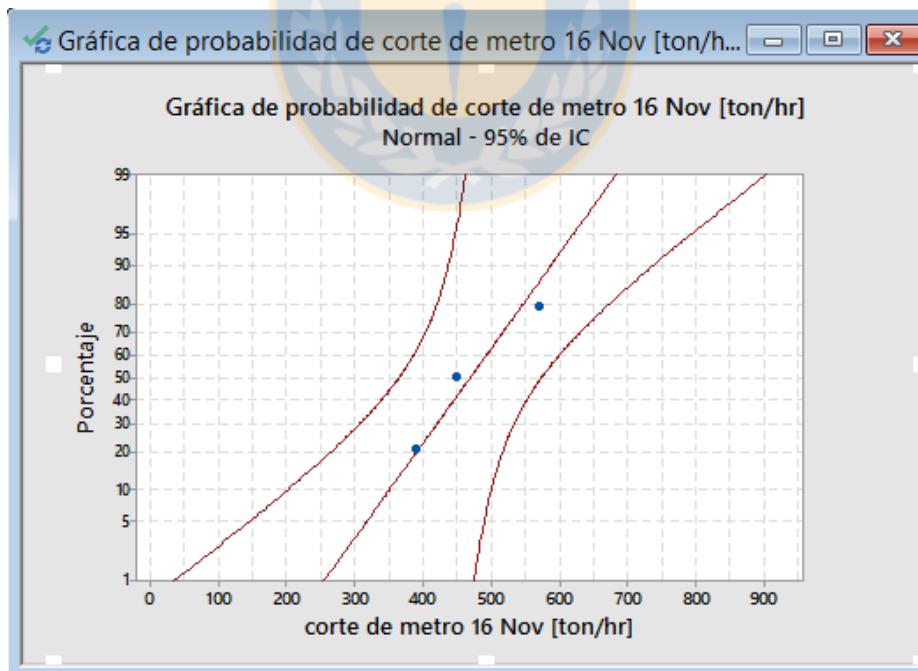


Figura 133: Gráfica de probabilidad de distribución normal para los datos de flujos máxicos provenientes de los cortes de la prueba del 16 de Noviembre en pesómetro molino 4.

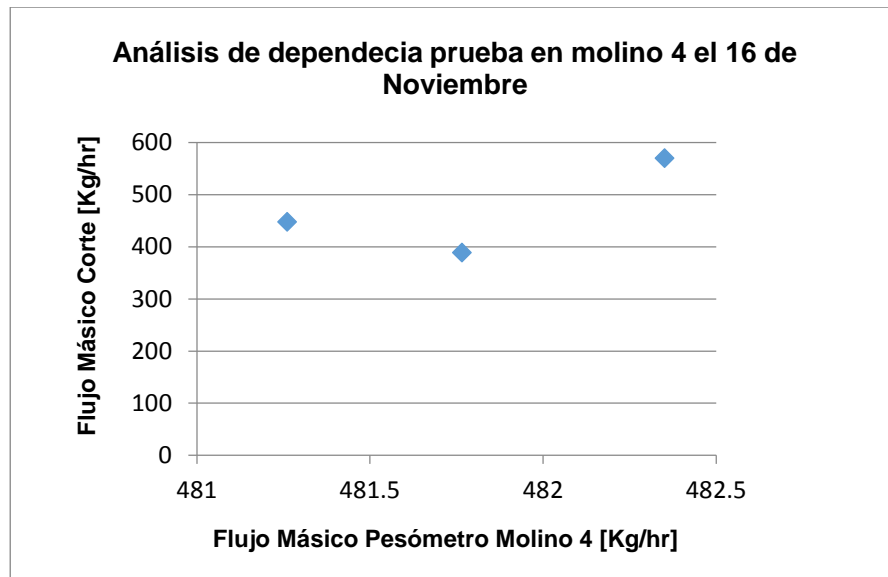


Figura 134: Gráfica de análisis de dependencia entre flujos másicos pesómetro molino 4 y flujos másicos obtenidos a través de cortes de metro en la prueba de contrastación del 16 de Noviembre.

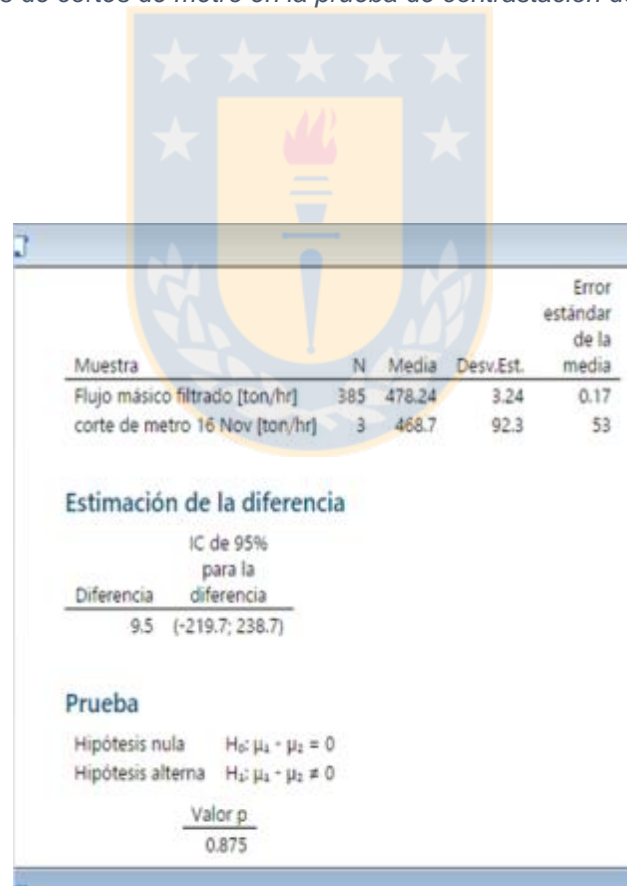


Figura 135: Resultado prueba t de hipótesis en minitab para la contrastación del 16 de Noviembre en Molino

## Mann-Whitney: corte de metro 16 Nov [ton/hr]

### Método

$\eta_1$ : mediana de corte de metro 16 Nov [ton/hr]  
 $\eta_2$ : mediana de Flujo másico filtrado [ton/hr]  
 Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

### Estadísticas descriptivas

	Muestra	N	Mediana
corte de metro 16 Nov [ton/hr]	3	447.648	
Flujo másico filtrado [ton/hr]	385	478.874	

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-31.2267	(-89.9638; 90.7648)	95.05%

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Valor W	Valor p
391.00	0.321

Figura 136: Resultado de la prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney para contrastación pesómetro molino 4, el 16 de Noviembre.

## Distribuciones, límites del 90% de los datos más probable y prueba de hipótesis en análisis del 28 de Noviembre para Molino 4

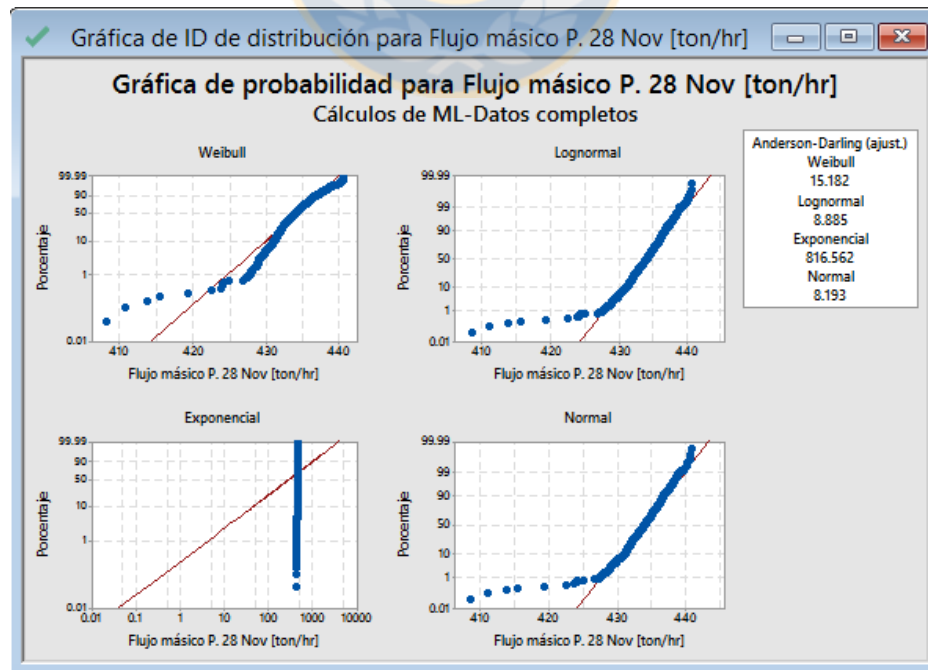


Figura 137: Gráficas de probabilidad de distribución en minitab para los datos de comportamiento más estable dentro de la prueba de contrastación en pesómetro molino 4, para el día 28 de Noviembre.

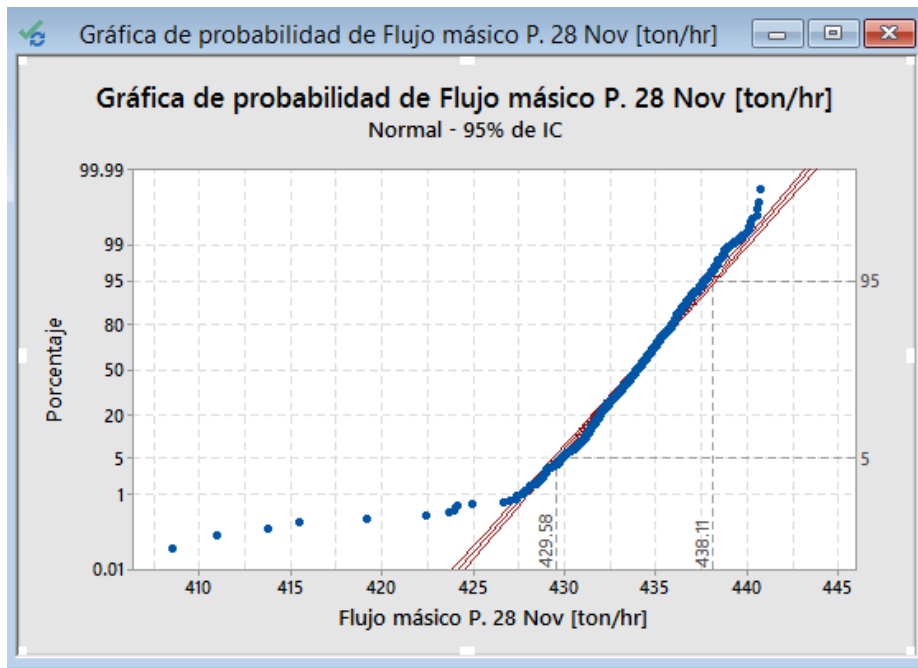


Figura 138: Gráfica de la distribución con mejor ajuste para flujos másicos en la prueba de contrastación del 28 de Noviembre en pesómetro alimentación molino 4 y límites para el noventa por ciento de datos más probables.

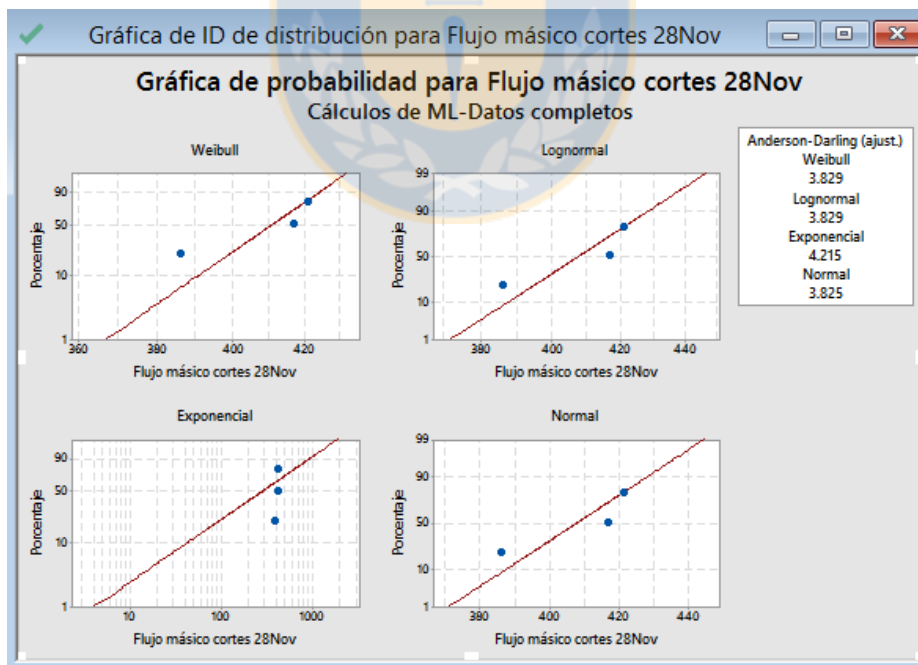


Figura 139: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 4, para el día 28 de Noviembre.

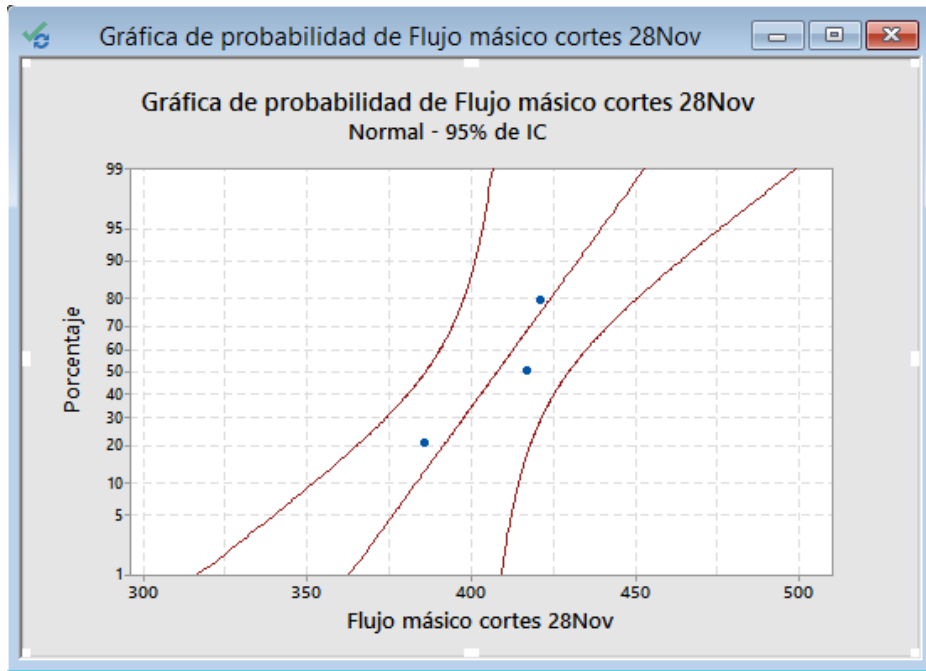


Figura 140: Gráfica de probabilidad de distribución normal para los datos de flujos másicos provenientes de los cortes de la prueba del 28 de Noviembre en pesómetro molino 4.

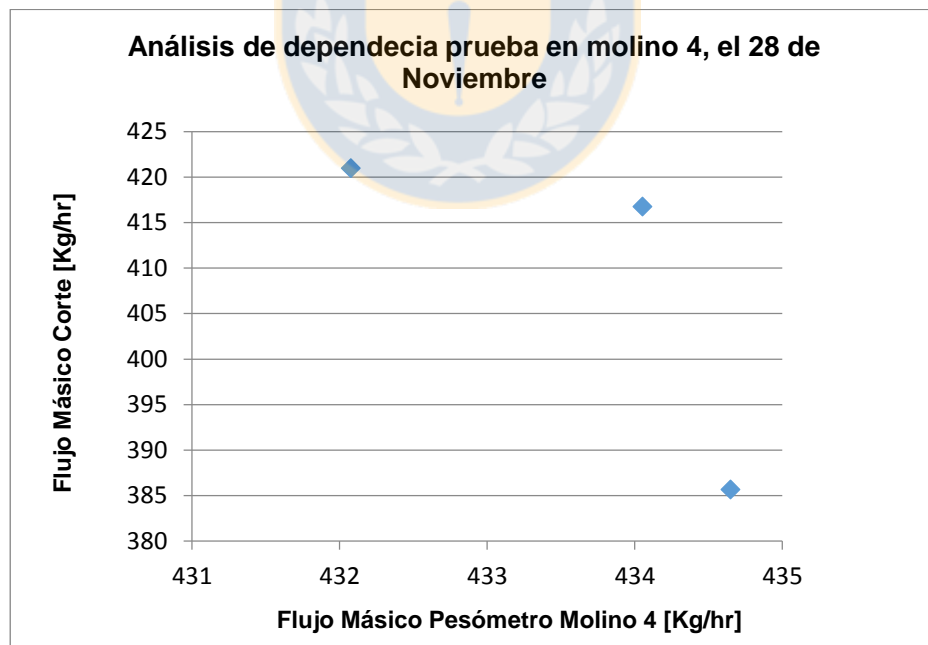


Figura 141: Gráfica de análisis de dependencia entre flujos másicos pesómetro molino 4 y flujos másicos obtenidos a través de cortes de metro en la prueba de contrastación del 28 de Noviembre.

Estadísticas descriptivas				
Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Flujo másico filtrado 28Nov	1672	433.95	1.91	0.047
Flujo másico cortes 28Nov	3	407.8	19.3	11

Estimación de la diferencia	
IC de 95% para la diferencia	
Diferencia	
26.2	(-21.8; 74.1)

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$
	Valor p
	0.143

Figura 142: Resultado prueba t de hipótesis en minitab para la contrastación de pesómetro de alimentación a molino el día 28 de Noviembre.

### Mann-Whitney: Flujo másico cortes 28Nov;

#### Método

$\eta_1$ : mediana de Flujo másico cortes 28Nov  
 $\eta_2$ : mediana de Flujo másico filtrado 28Nov  
 Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

#### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Mediana
Flujo másico cortes 28Nov	3	416.750
Flujo másico filtrado 28Nov	1672	433.999

#### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-17.2489	(-48.2413; -13.0744)	95.00%

#### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	6.00	0.003
Ajustado para empates	6.00	0.003

Figura 143: Resultado de la prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney para contrastación pesómetro molino 4, el 28 de Noviembre.

Distribuciones, límites del 90% de los datos más probables y prueba de hipótesis t en análisis del 29 de Noviembre para Molino 4

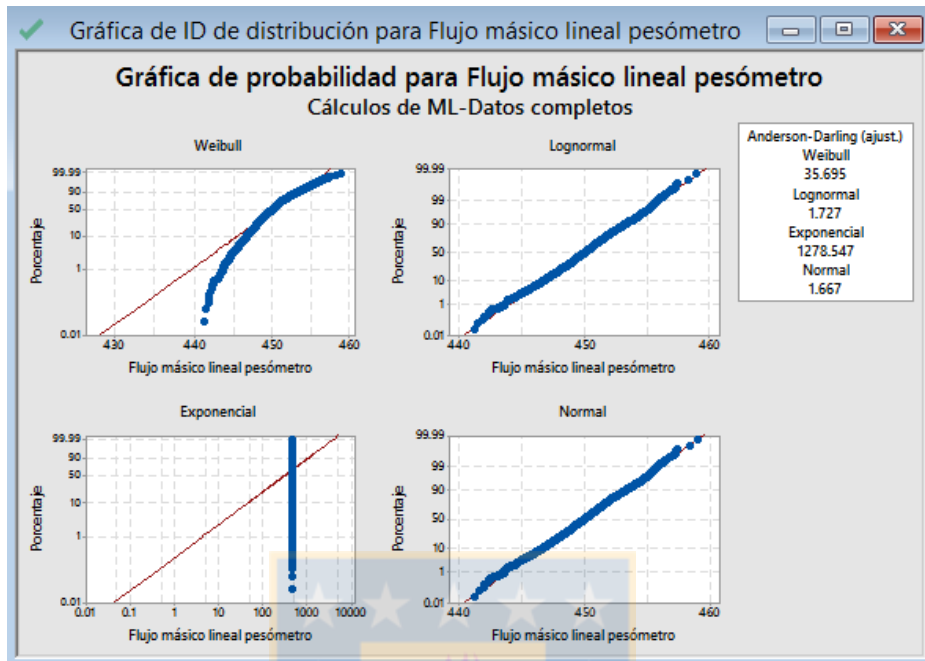


Figura 144: Gráficas de probabilidad de distribución en minitab para los datos de comportamiento más estable dentro de la prueba de contrastación en pesómetro de alimentación a molino 4, el día 29 de Noviembre.

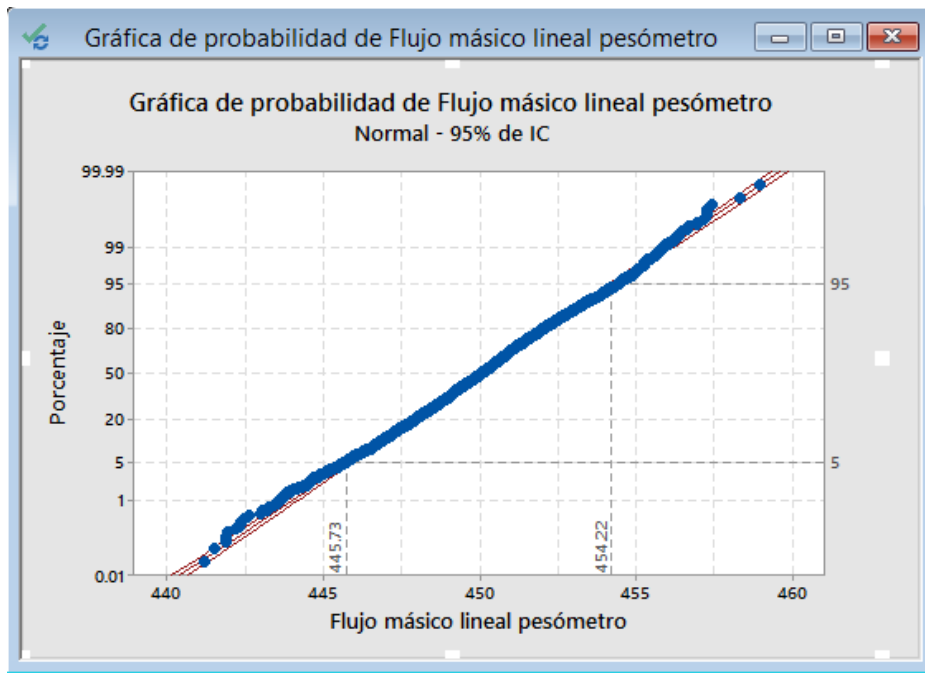


Figura 145: Gráfica de la distribución con mejor ajuste para los flujos másicos dentro de comportamiento más estables en la prueba de contrastación del 29 de Noviembre en pesómetro de alimentación molino 4 y límites de flujos másicos para el noventa por ciento de los dato más probable.

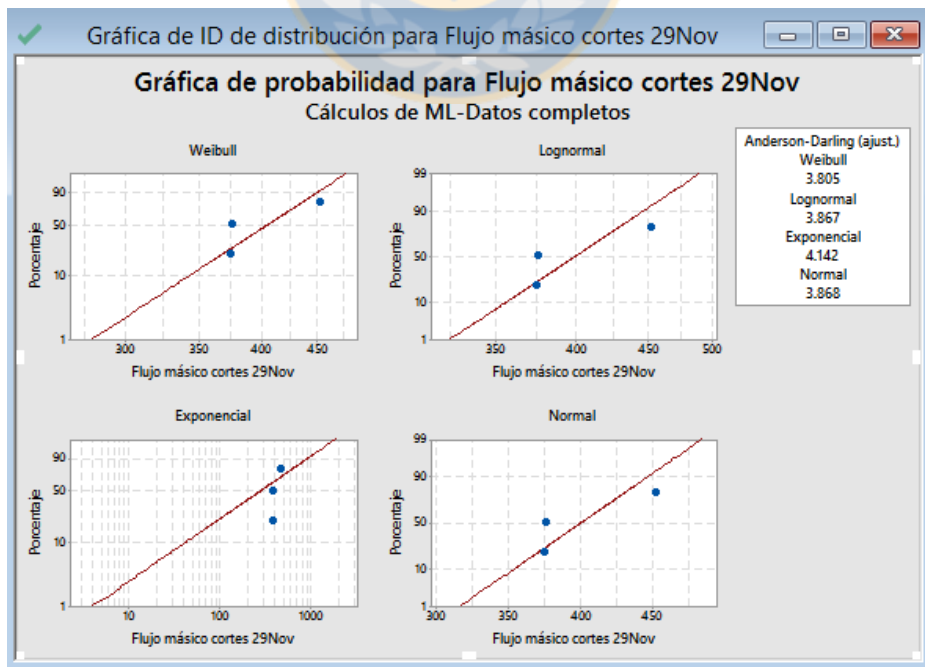


Figura 146: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 4, para el día 29 de Noviembre.



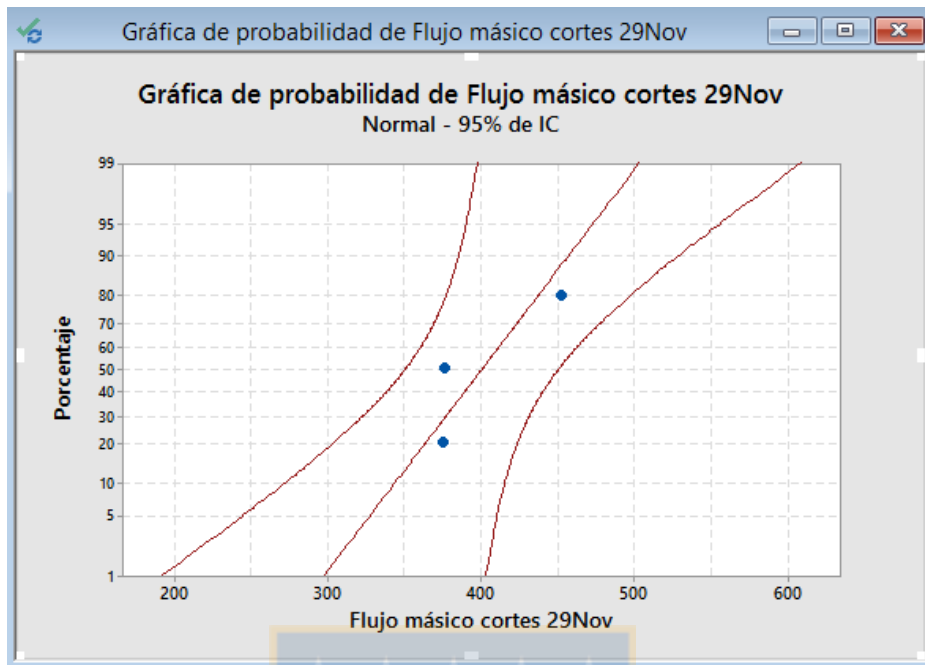


Figura 147: Ajuste de distribución normal para los datos de flujos máxicos provenientes de los cortes de la prueba del 29 de Noviembre en pesómetro molino 4.

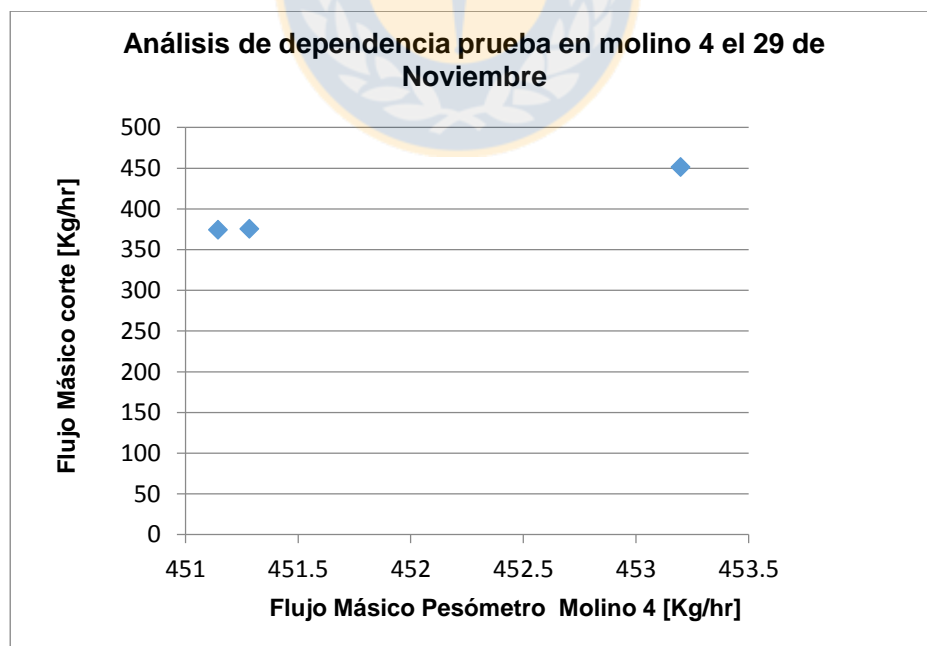


Figura 148: Gráfica de análisis de dependencia entre flujos máxicos pesómetro molino 4 y flujos máxicos obtenidos a través de cortes de metro en la prueba de contrastación del 29 de Noviembre

Estadísticas descriptivas				
Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Flujo másico filtrado[ton/hr]	2518	449.97	1.97	0.039
Flujo másico cortes 29Nov	3	400.3	44.2	26

Estimación de la diferencia	
IC de 95% para la diferencia	
Diferencia	
49.7	(-60.1; 159.4)

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$
Valor p	0.191

Figura 149: Resultado prueba t de hipótesis para la contrastación de pesómetro alimentación a molino 4 para el día 29 de Noviembre.

## Mann-Whitney: Flujo másico cortes 29Nov;

### Método

$\eta_1$ : mediana de Flujo másico cortes 29Nov  
 $\eta_2$ : mediana de Flujo másico filtrado[ton/hr]  
 Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

### Estadísticas descriptivas

	Muestra	N	Mediana
Flujo másico cortes 29Nov		3	375.42
Flujo másico filtrado[ton/hr]	2518		450.01

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-73.69	(-76.5791; 1.24884)	95.01%

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	1879.00	0.131
Ajustado para empates	1879.00	0.131

Figura 150: Resultado de la prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney para contrastación pesómetro molino 4, el 29 de Noviembre.

Tabla 48: Resumen de la diferencia en molino 4 y valores de P para prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney

Instrumento	Fecha	Diferencia con respecto a Corte	% De diferencia	Prueba de Hipótesis	P
<b>Molino 4</b>	16 de Nov	-31.22	-6.97	No se puede rechazar	0.321
	28 de Nov	-17.24	-4.14	Se rechaza	0.003
	29 de Nov	-73.68	-19.62	No se puede rechazar	0.131
<b>Promedio</b>		<b>-40.71</b>	<b>-10.24</b>	<b>No se puede rechazar</b>	<b>0.152</b>

**Distribución, límites para el 90% de los datos más probables y prueba de hipótesis t para la prueba en pesómetro Molino 3**

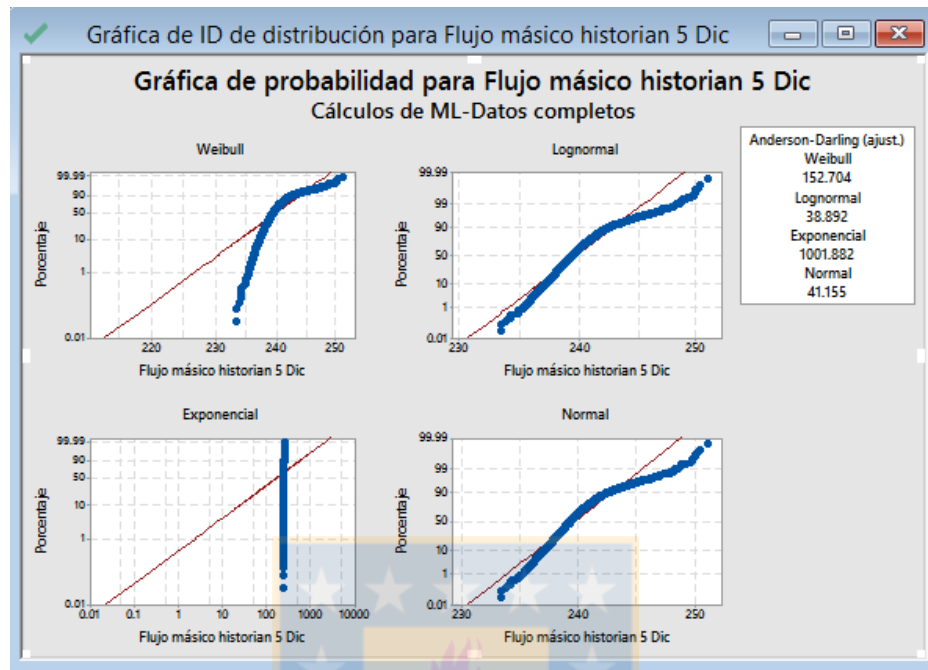


Figura 151: Gráficas de probabilidad de distribución en minitab para los datos de comportamiento más estable en la prueba de contrastación en pesómetro alimentación molino 3, el día 5 de Diciembre.

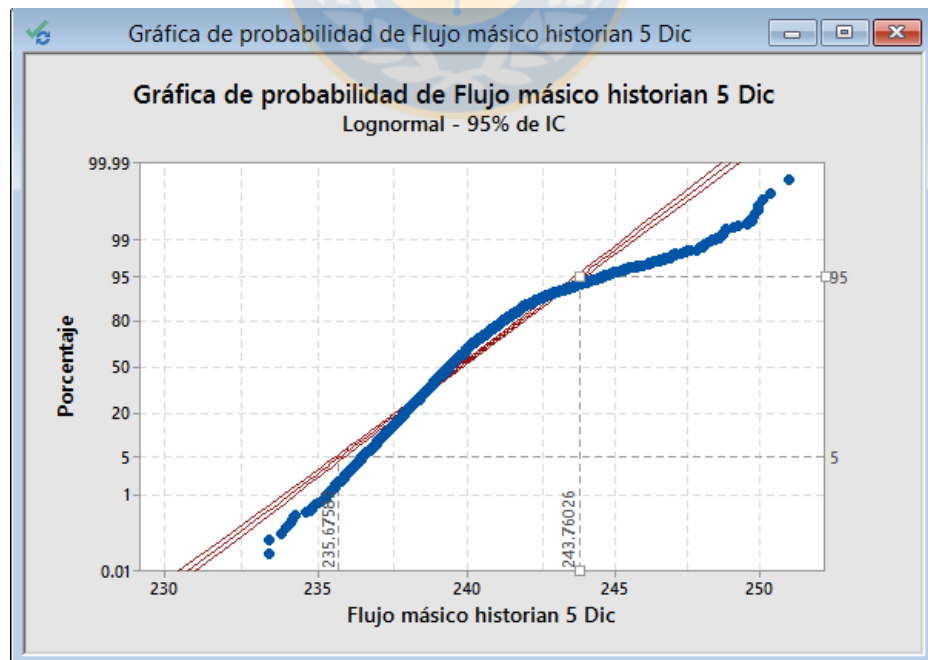


Figura 152: Gráfica de la distribución con mejor ajuste para flujos másicos en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 3, el 5 de Diciembre y límites de flujo másico para el noventa por ciento de datos más probables.

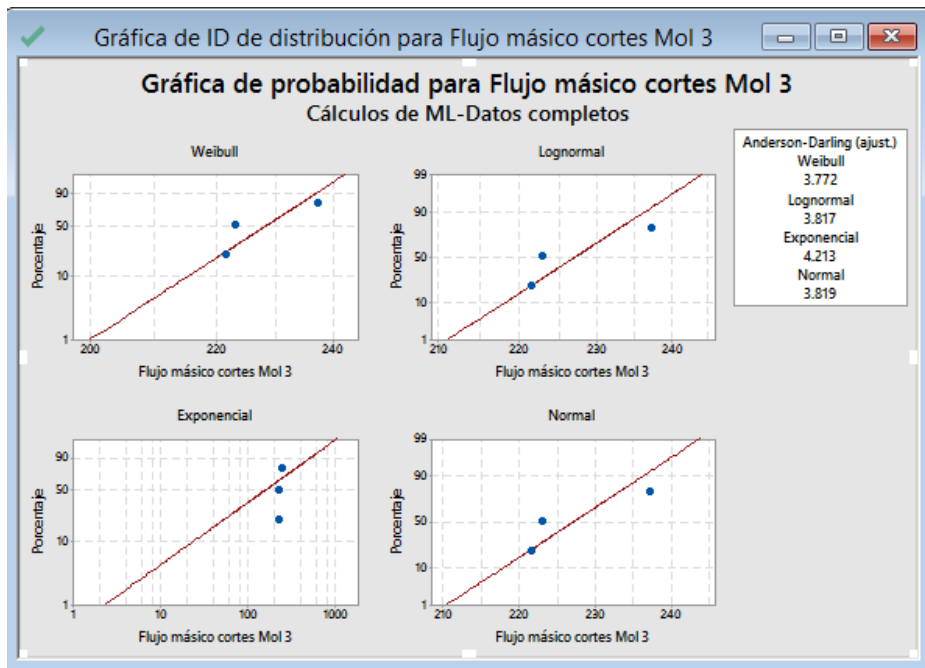


Figura 153: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a molino 3, para el día 5 de Diciembre.

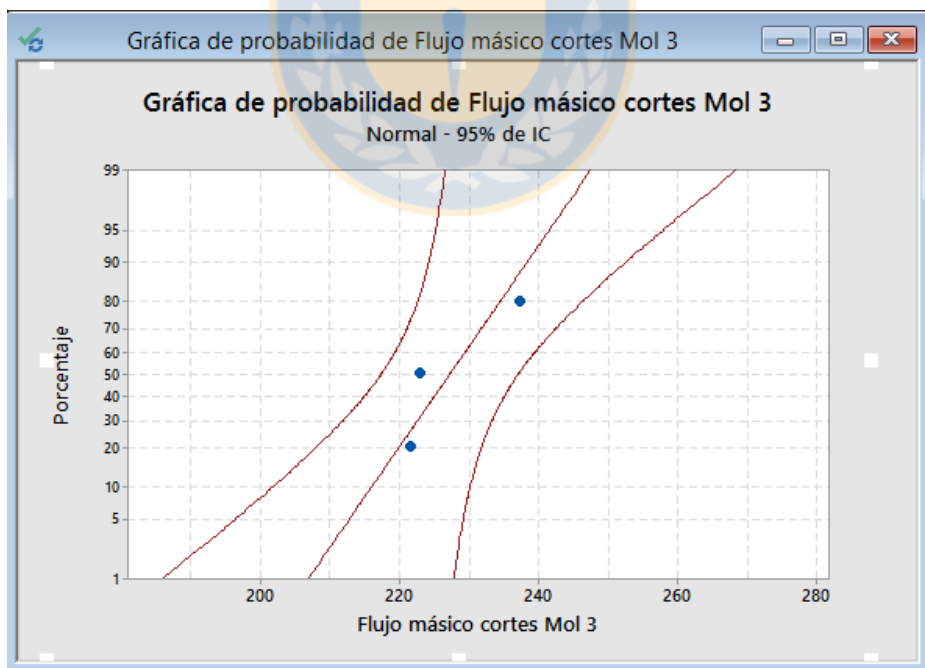


Figura 154: Ajuste de distribución normal para los datos de flujos másicos provenientes de los cortes de la prueba del 5 de Diciembre en pesómetro Molino 3.

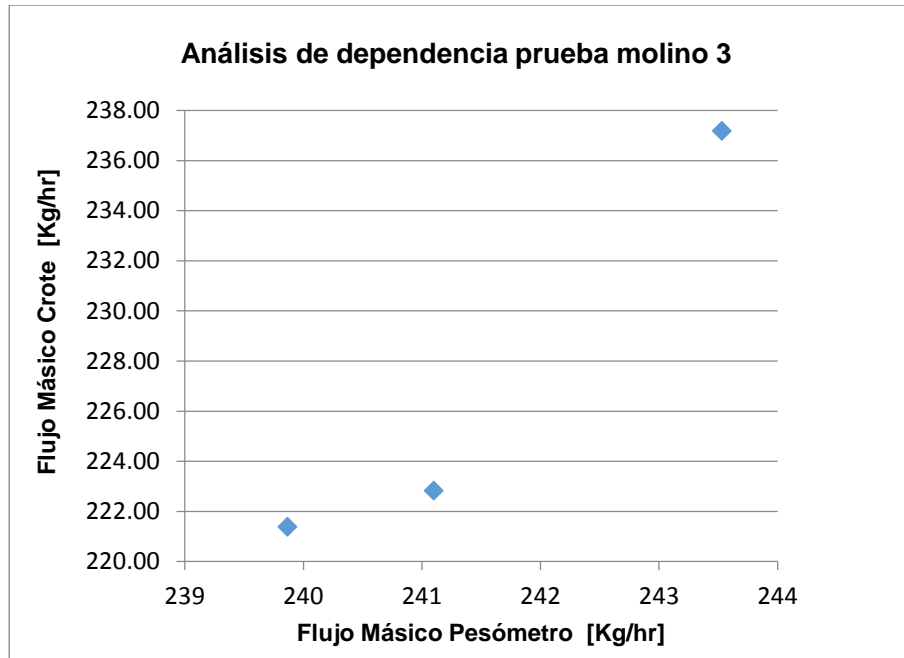


Figura 155: Gráfica de análisis de dependencia entre flujos másicos pesómetro Molino 3 y flujos másicos obtenidos a través de cortes de metro en la prueba de contrastación del 5 de Diciembre.

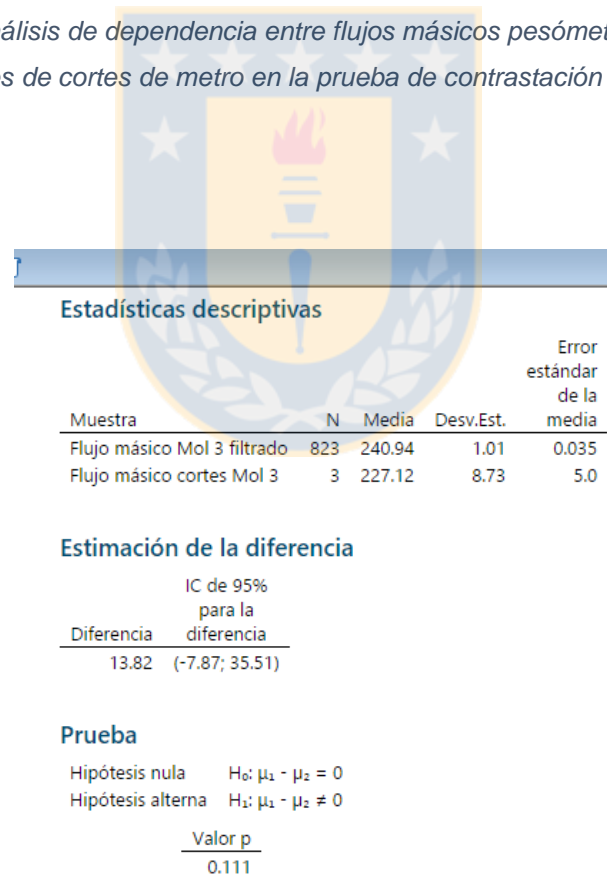


Figura 156: Resultado prueba t de hipótesis en minitab para la contrastación de pesómetro de alimentación a molino 3, el día 5 de Diciembre.

## Mann-Whitney: Flujo másico cortes Mol 3;

### Método

$\eta_1$ : mediana de Flujo másico cortes Mol 3  
 $\eta_2$ : mediana de Flujo másico Mol 3 filtrado  
 Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

### Estadísticas descriptivas

	Muestra	N	Mediana
Flujo másico cortes Mol 3		3	222.82
Flujo másico Mol 3 filtrado		823	240.72

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-17.90	(-19.6281; -3.60740)	95.01%

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Método	Valor W	Valor p
No ajustado para empates	6.00	0.003
Ajustado para empates	6.00	0.003

Figura 157: Resultado de la prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney para contrastación pesómetro molino 3, el 5 de Diciembre.



## Resultado de la prueba t de hipótesis en la contrastación del pesómetro de Preconcentrado alimentación a Silos

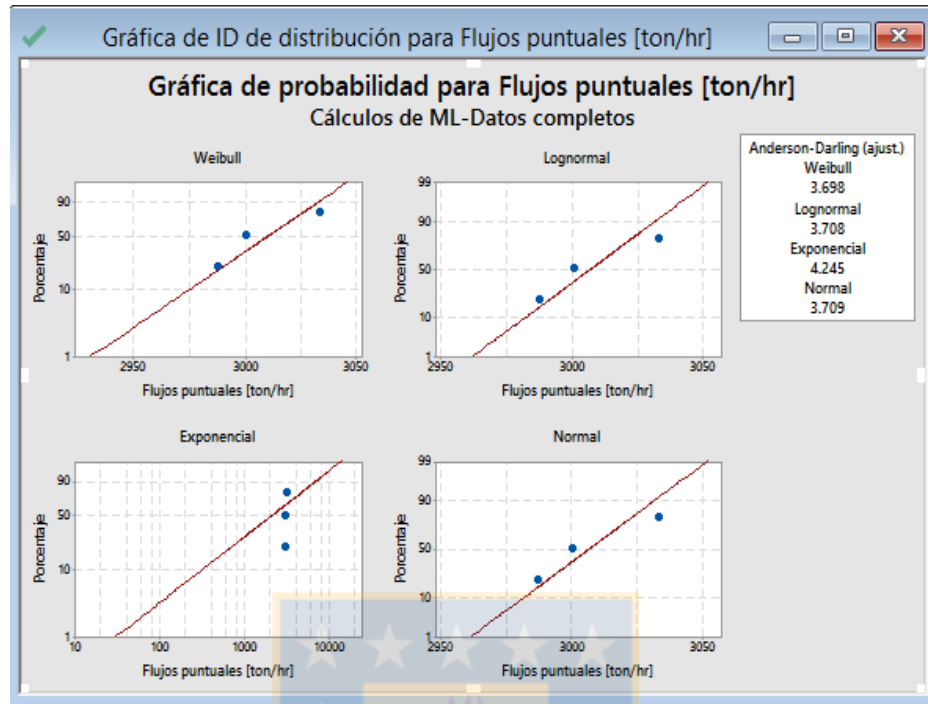


Figura 158: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico puntuales de la pantalla del pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos en la prueba de contrastación, para el día 10 de Diciembre.

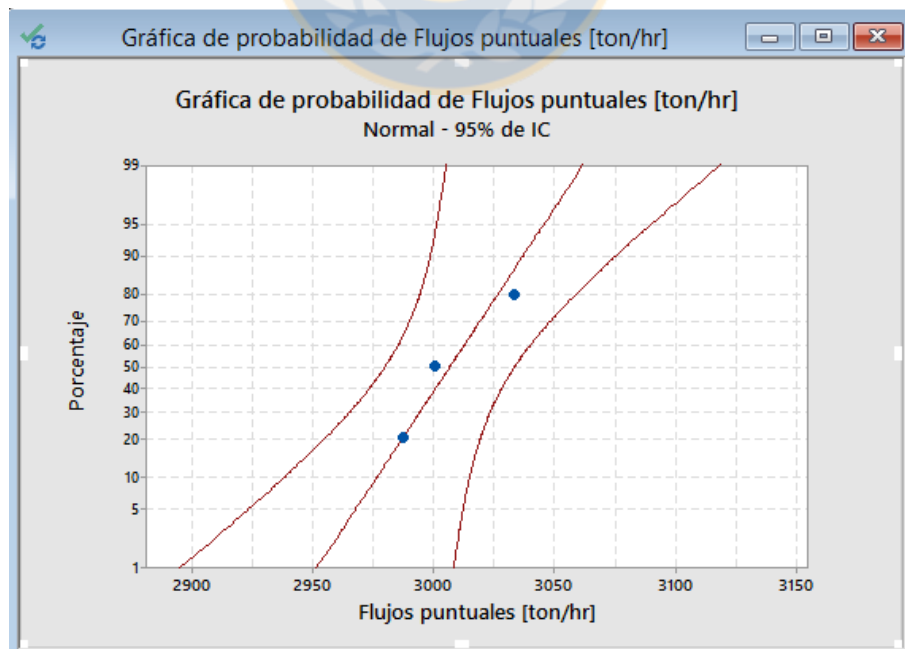


Figura 159: Ajuste de distribución normal para los datos de flujos másicos puntuales indicados en pantalla de pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos, en prueba del 10 de Diciembre.



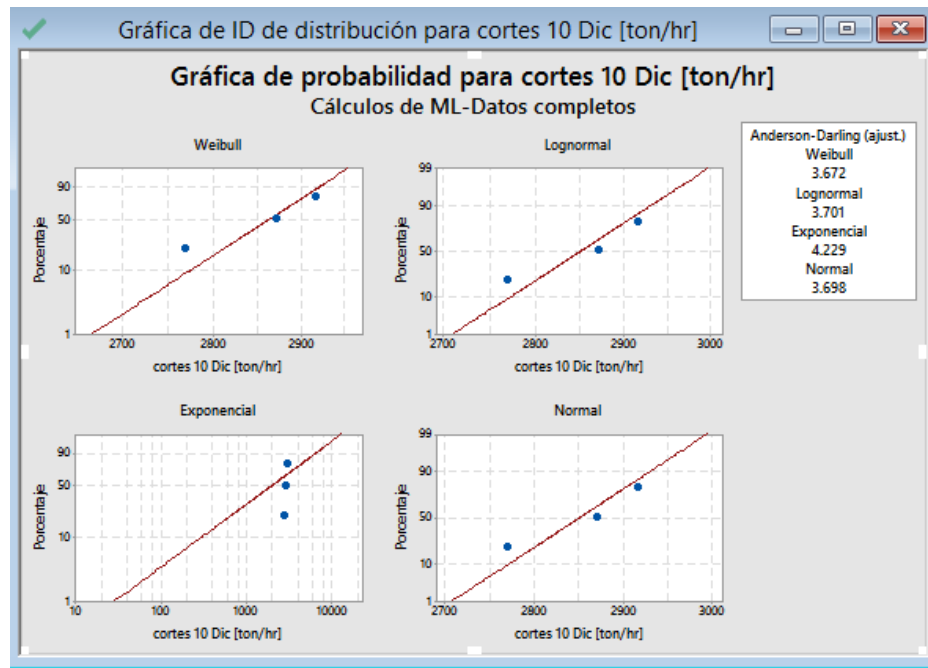


Figura 160: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de alimentación a silos para el día 10 de Diciembre.

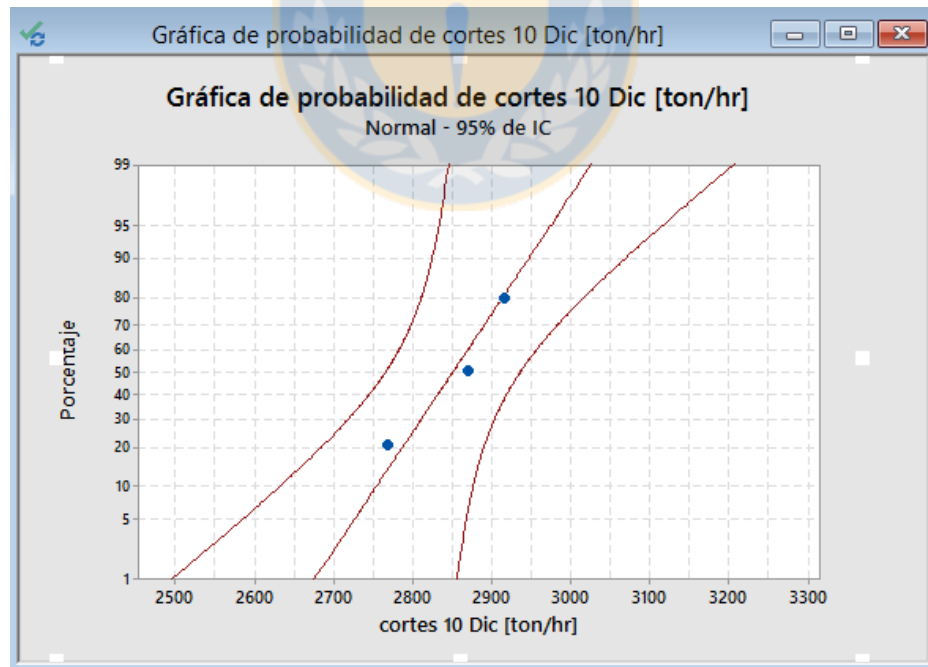


Figura 161: Ajuste de distribución normal para los datos de flujos másicos provenientes de los cortes de la prueba del 10 de Diciembre en pesómetro alimentación a silos.

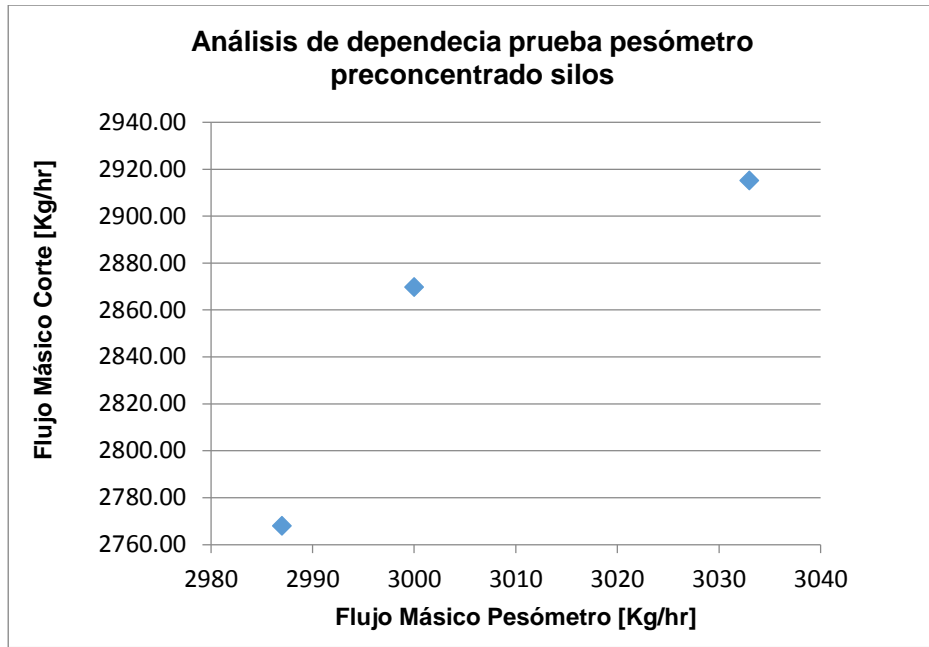


Figura 162: Gráfica de dependencia entre los flujos másicos puntuales del historial del pesómetro de alimentación a silos y los flujos másicos obtenidos en los cortes de la prueba del 10 de Diciembre.

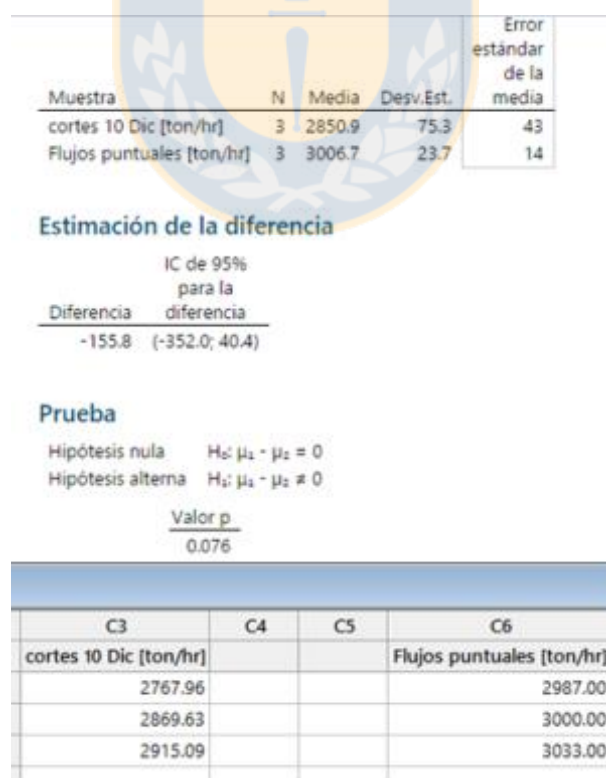


Figura 163: Resultado prueba t de hipótesis en minitab para la contrastación de pesómetro de alimentación de preconcentrado a silos el día 10 de Diciembre.

### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
cortes 10 Dic [ton/hr]	3	2850.9	75.3	43.5
Flujos puntuales [ton/hr]	3	3006.7	23.7	13.7

### Estimación de la diferencia pareada

Media	Desv.Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ
-155.8	55.1	31.8	(-292.8; -18.8)

diferencia\_μ: media de (cortes 10 Dic [ton/hr] - Flujos puntuales [ton/hr])

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0$ : diferencia\_μ = 0

Hipótesis alterna  $H_1$ : diferencia\_μ ≠ 0

Valor p

0.039

Figura 164: Resultado prueba t de hipótesis para muestras pareadas en la prueba de contrastación de pesómetro alimentación a silos el 10 de Diciembre.

### Estadísticos descriptivos: cortes 10 Dic [ton/hr]; Flujos ... uales [ton/hr]

#### Estadísticas

Variable	N	N*	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Q3
cortes 10 Dic [ton/hr]	3	0	2850.9	43.5	75.3	2768.0	2768.0	2869.6	2915.1
Flujos puntuales [ton/hr]	3	0	3006.7	13.7	23.7	2987.0	2987.0	3000.0	3033.0
Variable	Máximo								
cortes 10 Dic [ton/hr]	2915.1								
Flujos puntuales [ton/hr]	3033.0								

Figura 165: Prueba de hipótesis no paramétrica de Wilcoxon para la contrastación de pesómetro de preconcentrado alimentación a silos para el día 10 de Diciembre

## Wilcoxon Signed Rank: cortes 10 Dic [ton/hr],

### Datos

Paired test for cortes 10 Dic [ton/hr] - Flujos puntuales [ton/hr]

### Método

$\eta$ : mediana de Difference

### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Mediana
Difference	3	-149.42

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta = 0$

Hipótesis alterna  $H_1: \eta \neq 0$

Muestra	Número de prueba	Estadística de Wilcoxon	Valor p
Difference	3	0.00	0.181

Figura 166: Resultado prueba de hipótesis no paramétrica de Wilcoxon para la contrastación de pesómetro de preconcentrado alimentación a silos para el día 10 de Diciembre

**Distribución, límites para 90% de los datos más probables y prueba de hipótesis t para la prueba en pesómetro de pellet producto**

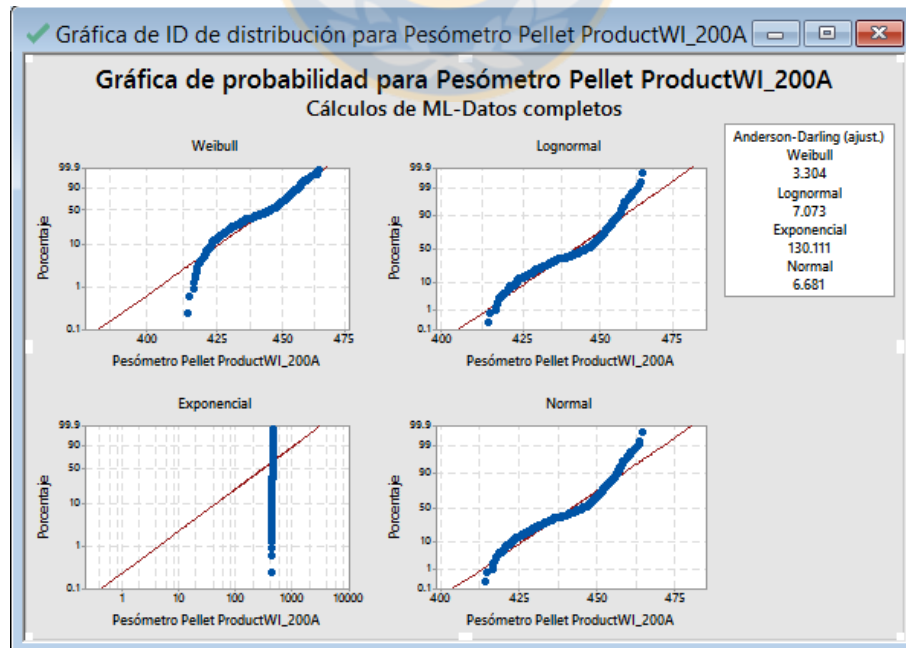


Figura 167: Gráficas de probabilidad de distribución en minitab para lo datos de comportamiento más estable en la prueba de contrastación en pesómetro de pellet producto para el día 11 de Diciembre.

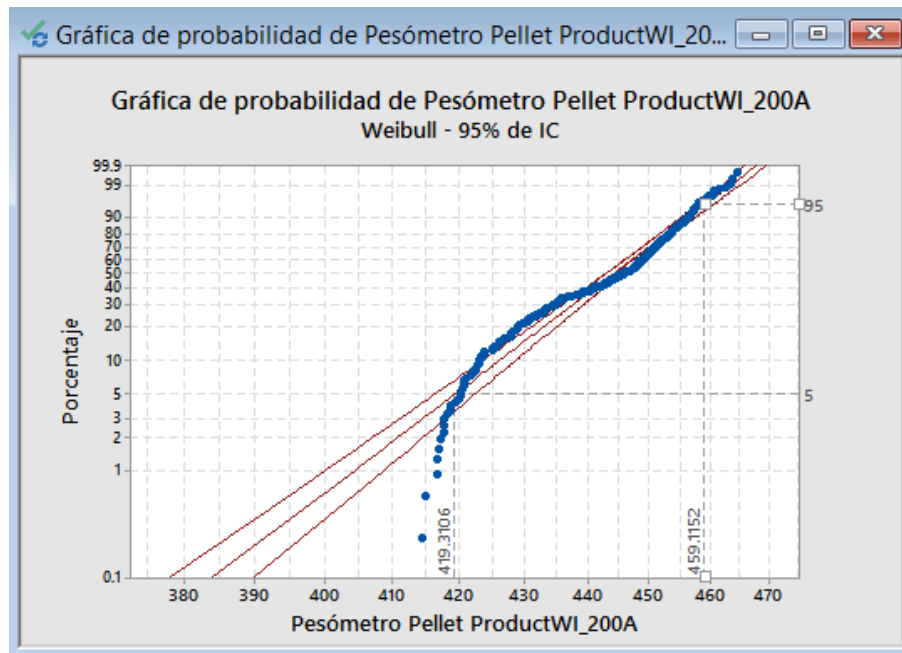


Figura 168: Gráfica de la distribución con mejor ajuste para flujos másicos en la prueba de contrastación en pesómetro de pellet producto el día 11 de Diciembre y límites para el noventa por ciento de los datos más probables.

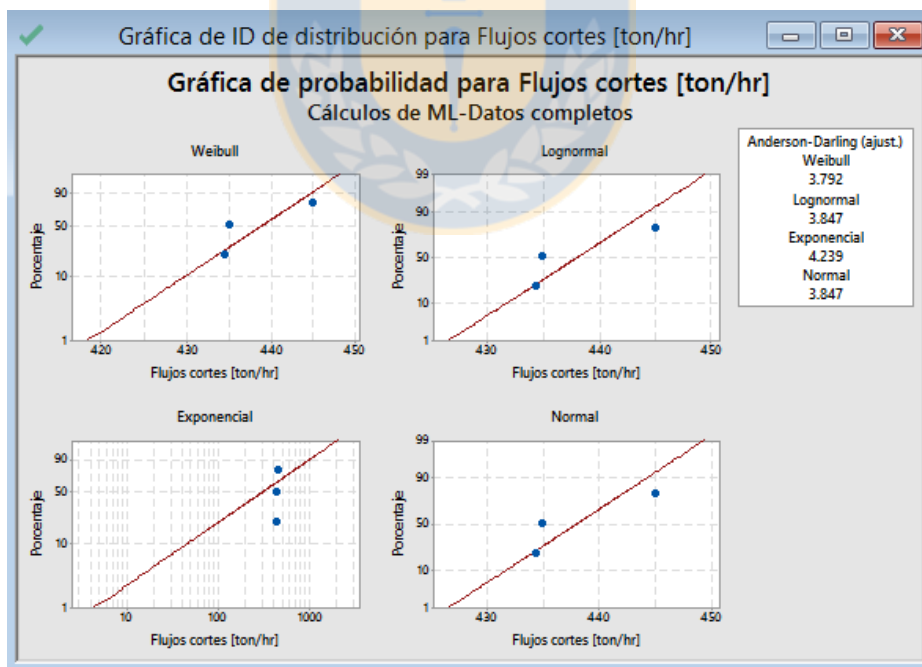


Figura 169: Gráficas de probabilidad de distribución para los datos de flujo másico de los cortes en la prueba de contrastación de pesómetro de Pellet producto, para el día 11 de Diciembre.

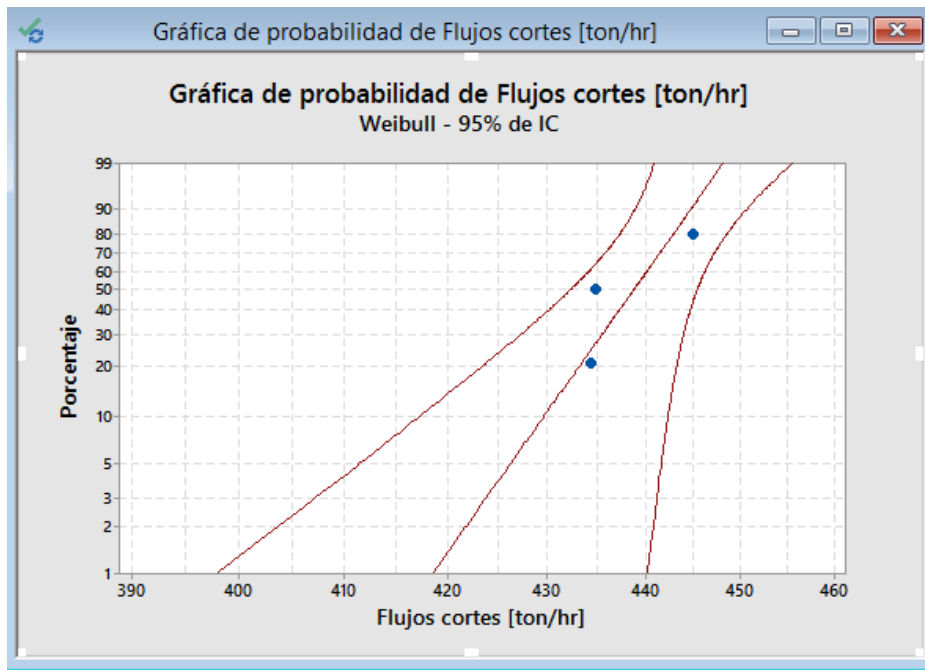


Figura 170: Gráfica de probabilidad de distribución weibull para los datos de flujos máxicos provenientes de los cortes de la prueba del 11 de Diciembre en pesómetro pellet producto

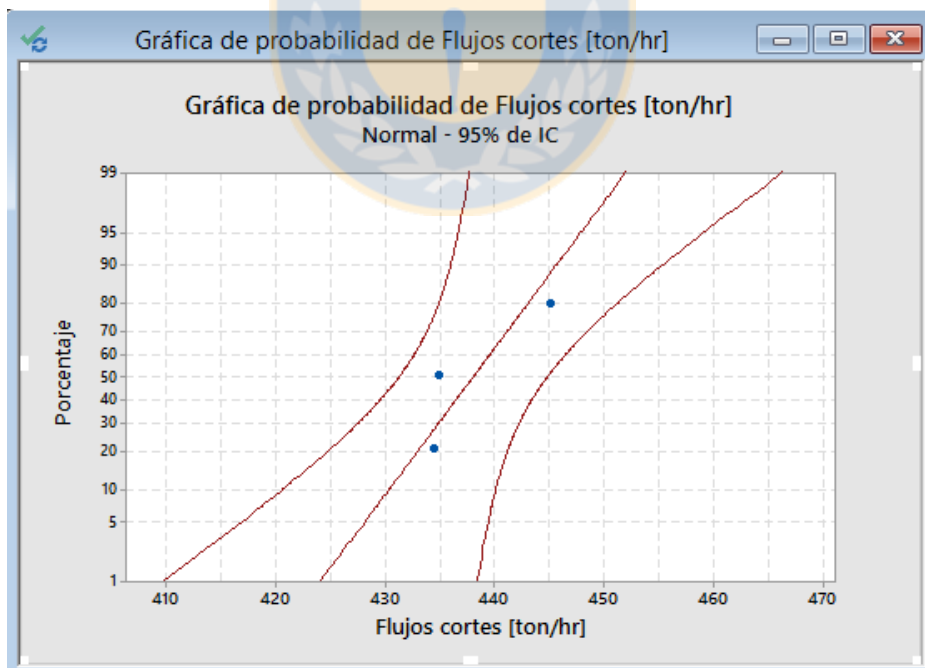


Figura 171: Ajuste de distribución normal para los datos de flujos máxicos provenientes de los cortes de la prueba del 11 de Diciembre en pesómetro pellet producto.

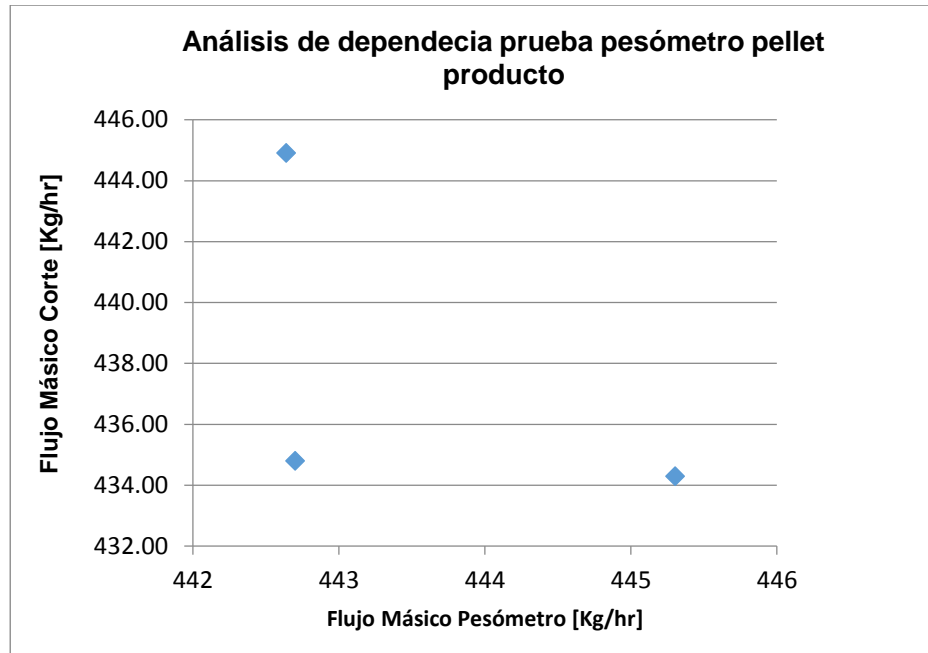


Figura 172: Gráfica de análisis de dependencia entre flujos másicos historian y flujos másicos obtenidos a través de cortes de metro en la prueba de contrastación de pesómetro pellet producto para el 11 de



Figura 173: Resultado prueba t de hipótesis de comparación demedias en minitab para la contrastación de pesómetro de pellet producto el día 11 de Diciembre.

## Mann-Whitney: Flujos cortes [ton/hr];

### Método

$\eta_1$ : mediana de Flujos cortes [ton/hr]  
 $\eta_2$ : mediana de Pesómetro filtrado WI\_200A  
 Diferencia:  $\eta_1 - \eta_2$

### Estadísticas descriptivas

Muestra	N	Mediana
Flujos cortes [ton/hr]	3	434.7927
Pesómetro filtrado WI_200A	279	445.9499

### Estimación de la diferencia

Diferencia	IC para la diferencia	Confianza lograda
-6.5397	(-17.00; 9.05)	95.05%

### Prueba

Hipótesis nula  $H_0: \eta_1 - \eta_2 = 0$   
 Hipótesis alterna  $H_1: \eta_1 - \eta_2 \neq 0$

Valor W	Valor p
286.00	0.326

Figura 174: Resultado de la prueba de hipótesis no paramétrica de Mann-Whitney para contrastación pesómetro pellet producto, el 11 de Diciembre.

## Cálculo de acumulación de masa en Silos

Tabla 49: Resultado cálculo de acumulación masa silos para el caso de alturas finales e iniciales en el tercer nivel

$\Delta M$ ambas tercer nivel [Ton]	
2170.25	delta VBA
2358.96	integral VBA
2170.24	delta excel
2358.96	integral excel
188.72	diferencia integral y delta [ton]
8.70	% diferencia



Tabla 50. Resultado prueba planilla “Cálculo de acumulación masa silo” para el caso de descarga de silo desde el primer nivel y hasta el primer nivel

<b><math>\Delta M</math> ambas primer nivel [Ton]</b>	
-2028.71	delta VBA
-1816.40	integral VBA
-2028.70	delta excel
-2064.09	integral excel
212.31	diferencia integral y delta [ton]
-10.47	% diferencia

Tabla 51: Resultado de cálculo de masa descargada para el caso de altura inicial en el segundo nivel y altura final en el primer nivel

<b><math>\Delta M</math> en segundo a primer nivel [Ton]</b>	
-4361.06	delta VBA
-4034.78	integral VBA
-4361.05	delta excel
-4080.13	integral excel
326.28	diferencia integral y delta [ton]
-7.48	% diferencia

Tabla 52: Resultado de masa descargada en silo desde altura inicial en tercer nivel a altura final en segundo nivel

<b><math>\Delta M</math> en tercero a segundo nivel [Ton]</b>	
-4819.30	delta VBA
-4525.76	integral VBA
-4819.29	delta excel
-4589.26	integral excel
-293.54	diferencia integral y delta [ton]
6.09	% diferencia

Tabla 53: Resultado de masa acumulada en silo desde altura inicial en primer nivel a altura final tercer nivel

$\Delta M$ en primer y tercer nivel [Ton]	
7321.86	delta VBA
7175.54	integral VBA
7321.01	delta excel
7277.43	integral excel
-146.32	diferencia integral y delta [ton]
- 1.99	% diferencia

**Pruebas sensibilización densímetro**

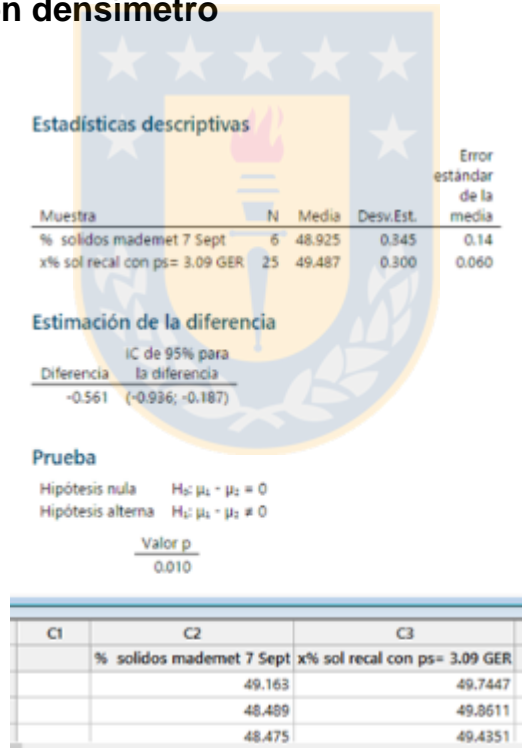


Figura 175: Resultado prueba de hipótesis de comparación entre el porcentaje de sólido de la muestra llevada a laboratorio y el porcentaje de sólido al usar la densidad de sólido promedio del día para el 7 de Septiembre.

Tabla 54: Tabla de intervalos de confianza para la media del porcentaje de sólido analizado en Mademet para el día 7 de Septiembre.

<b>Media</b>	48.93	<b>N</b>	6
<b>desviación estándar</b>	0.34	<b>significancia</b>	0.05
<b>Amplitud</b>	0.36		
<b>Límite inferior</b>	48.56		
<b>Límite superior</b>	49.29		

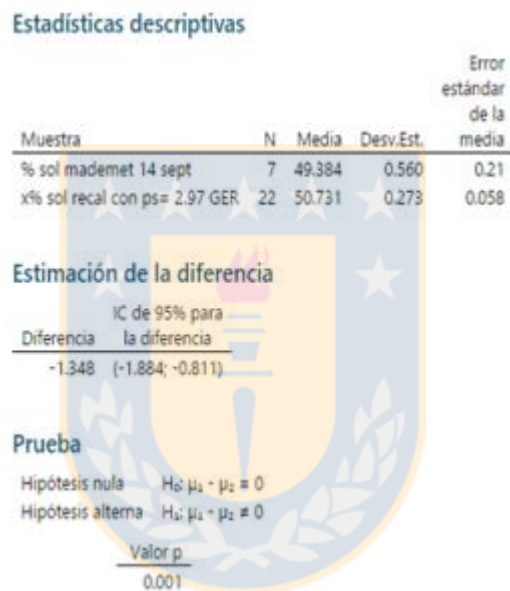


Figura 176: Resultado prueba de hipótesis de comparación entre el porcentaje de sólido de la muestra y el porcentaje de sólido al usar la densidad de sólido promedio del día para el 14 de Septiembre.

Tabla 55: Tabla de intervalos de confianza para la media del porcentaje de sólido analizado en mademet para el día 14 de Septiembre.

<b>Media</b>	49.38	<b>N</b>	7
<b>desviación estándar</b>	0.56	<b>significancia</b>	0.05
<b>Amplitud</b>	0.41		
<b>Límite inferior</b>	48.96		
<b>Límite superior</b>	49.79		

Estadísticas descriptivas				
Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
% sol mademett 21 sept	7	50.516	0.748	0.28
% sol historian con ps=3.12	17	51.065	0.313	0.076

Estimación de la diferencia	
IC de 95% para la diferencia	
Diferencia	
-0.549	(-1.265; 0.167)

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$
Valor p	0.110

Figura 177: Prueba de hipótesis comparación de porcentaje de sólido entre el porcentaje de sólido de la muestra y el porcentaje de sólido al usar la densidad de sólido del día para el 21 de Septiembre.

Tabla 56: Tabla de intervalos de confianza para la media del porcentaje de sólido analizado en mademet para el día 21 de Septiembre

<b>Media</b>	50.52	<b>N</b>	7.00
<b>desviación estándar</b>	0.75	<b>significancia</b>	0.05
<b>Amplitud</b>	0.55		
<b>Límite inferior</b>	49.96		
<b>Límite superior</b>	51.07		

Estadísticas descriptivas				
Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
% sol mademet 28 sept	7	50.172	0.324	0.12
% sol recal ps= 3.06	17	50.890	0.325	0.079

Estimación de la diferencia	
Diferencia	IC de 95% para la diferencia
-0.717	(-1.038; -0.397)

Prueba	
Hipótesis nula	$H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
Hipótesis alterna	$H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$
Valor p	
0.000	

Figura 178: Prueba de hipótesis comparación de porcentaje de sólido entre el porcentaje de sólido de la muestra y el porcentaje de sólido al usar la densidad de sólido del día para el 28 de Septiembre

Tabla 57: Tabla de intervalos de confianza para la media del porcentaje de sólido analizado en mademet para el día 28 de Septiembre

<b>Media</b>	50.17	<b>N</b>	7.00
<b>desviación estándar</b>	0.32	<b>significancia</b>	0.05
<b>Amplitud</b>	0.24		
<b>Límite inferior</b>	49.93		
<b>Límite superior</b>	50.41		

Case	Adjusted test statistic	1 - $\alpha$			
		0.900	0.950	0.975	0.990
All parameters known	$A_n^2$ for $n \geq 5$	1.933	2.492	3.070	3.857
$N(\bar{X}(n), S^2(n))$	$\left(1 + \frac{4}{n} - \frac{25}{n^2}\right) A_n^2$	0.632	0.751	0.870	1.029
$\text{Expo}(\bar{X}(n))$	$\left(1 + \frac{0.6}{n}\right) A_n^2$	1.070	1.326	1.587	1.943
$\text{Weibull}(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$	$\left(1 + \frac{0.2}{\sqrt{n}}\right) A_n^2$	0.637	0.757	0.877	1.038
$\text{Log-logistic}(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$	$\left(1 + \frac{0.25}{\sqrt{n}}\right) A_n^2$	0.563	0.660	0.769	0.906

Figura 179: Fórmulas para la obtención de los coeficientes Anderson- Darling y sus valores críticos []

## Subrutinas acumulación masa silos y agitadores

### Sub rutina Masa acumulada en silos en planilla “Cálculo acc silos diaria y minutos”

Sub Mt()

Hm = Cells(4, 3)

rho\_nocompactada = Cells(5, 6)

rho\_semicompactada = Cells(6, 6)

rho\_compactada = Cells(7, 6)

diametro = Cells(5, 3)

radio = (diametro) / 2

Pi = 3.1416

a = (Pi \* (radio) ^ (2))

h\_inicial = Cells(14, 8)

h\_final = Cells(14, 9)

h\_min = Cells(14, 11)

h\_max = Cells(14, 12)

n = Cells(3, 6)

```
Dim h(1440) As Double
```

```
Dim t(1440) As Double
```

```
'para todas las altura del día
```

```
For j = 14 To (n + 13)
```

```
h(j - 13) = Cells(j, 7)
```

```
t(j - 13) = Cells(j, 5)
```

```
Next
```

```
'-----Caso I i)
```

```
'---- Integral VBA da un 3,3% más de lo que entrega el delta
```

```
If (h_inicial <= (Hm / 3) And h_final <= (Hm / 3)) Then
```

```
Delta = a * rho_nocompactada * ((h_final) - (h_inicial))
```

```
Cells(14, 15) = Delta
```

```
Dim dhdt(86400) As Double
```

```
'----en el for poner la diferencia
```

```
dhdt(1) = 1 * a * rho_nocompactada
```

```
Cells(14, 13) = dhdt(1)
```

```
For i = 2 To (n)
```

```
dhdt(i) = ((h(i) - h(i - 1)) / (t(i) - t(i - 1))) * a * rho_nocompactada
```

```
Cells(i + 13, 13) = dhdt(i)
```

```
Next
```

```
Ma = 0
```

```
For i = 2 To (n)
```

```
Mj = 0.5 * (t(i) - t(i - 1)) * (dhdt(i) + dhdt(i - 1))
```

```

Ma = Mj + Ma
Cells(i + 13, 14) = Ma
Next

```

```

Cells(15, 15) = Ma
End If

```

```

'-----caso I ii) ambos en el segundo nivel
If ((Hm / 3) <= h_inicial And h_inicial <= (2 * Hm / 3) And (Hm / 3) <= h_final And h_final <= (2 * Hm / 3)) Then

```

```

Delta = a * (rho_nocompactada * ((h_final) - (h_inicial)))
Cells(14, 22) = Delta

```

```

Dim dmdt(86400) As Double

```

```

'---en el for poner la diferencia
dmdt(1) = 1 * a * rho_nocompactada
Cells(14, 20) = dmdt(1)

```



```

For i = 2 To (n)
dmdt(i) = ((h(i) - h(i - 1)) / (t(i) - t(i - 1))) * a * rho_nocompactada
Cells(i + 13, 20) = dmdt(i)
Next

```

```

Ma = 0

```

```

For i = 2 To (n)
Mj = 0.5 * (t(i) - t(i - 1)) * (dmdt(i) + dmdt(i - 1))

```

```

Ma = Mj + Ma
Cells(i + 13, 21) = Ma
Next

```



```

Cells(15, 22) = Ma
End If

'-----caso I) ambos en el tercer nivel
If ((2 * Hm / 3) <= h_inicial And h_inicial <= (Hm) And (2 * Hm / 3) <= h_final And h_final <= (Hm))
Then

Delta = a * (rho_nocompactada * ((h_final) - (h_inicial)))
Cells(14, 30) = Delta

Dim dmdt_I(86400) As Double

'----en el for poner la diferencia
dmdt_I(1) = 1 * a * rho_nocompactada
Cells(14, 28) = dmdt_I(1)

For i = 2 To (n)
dmdt_I(i) = ((h(i) - h(i - 1)) / (t(i) - t(i - 1))) * a * rho_nocompactada
Cells(i + 13, 28) = dmdt_I(i)
Next

Ma = 0

For i = 2 To (n)
Mj = 0.5 * (t(i) - t(i - 1)) * (dmdt_I(i) + dmdt_I(i - 1))

Ma = Mj + Ma
Cells(i + 13, 29) = Ma
Next

Cells(15, 30) = Ma
End If

```



'-----FIN CASO AMBOS EN EL MISMO NIVEL -----

'-----caso II i) inicial en el primer nivel, h\_final en el segundo nivel

'---- con la integral entrega un valor de 728 y debería ser 722, esto es una diferencia de 6 ton que es 0.83% de error,

'--la integral entrega un valor un poco superior que el delta

If (h\_inicial <= (Hm / 3) And (Hm / 3) <= h\_final And h\_final <= (2 \* Hm / 3)) Then

delta\_a = a \* (rho\_semicompactada \* ((Hm / 3) - h\_inicial) + rho\_nocompactada \* (h\_final - (Hm / 3)))

Cells(14, 38) = delta\_a

Dim dmdt\_a(86400) As Double

dmdt\_a(1) = 1 \* a \* rho\_semicompactada

Cells(14, 36) = dmdt\_a(1)

For i = 2 To (n)

If h(i) < (Hm / 3) Then

dmdt\_a(i) = ((h(i) - h(i - 1)) / (t(i) - t(i - 1))) \* a \* rho\_semicompactada

Cells(i + 13, 36) = dmdt\_a(i)

Else

dmdt\_a(i) = ((h(i) - h(i - 1)) / (t(i) - t(i - 1))) \* a \* rho\_nocompactada

Cells(i + 13, 36) = dmdt\_a(i)

End If

Next

Ma\_a = 0

```

For i = 2 To (n)
Mj_3 = 0.5 * (t(i) - t(i - 1)) * (dmdt_a(i) + dmdt_a(i - 1))
Ma_a = Mj_3 + Ma_a
Cells(i + 13, 37) = Ma_a
Next

```

```

Cells(15, 38) = Ma_a

```

```

End If

```

```

'----- CASO II ii) h inicial en el primer nivel y hfinal en el tercer nivel
'----- Integral entrega 1585 y delta 1565, esto es una diferencia de 24 ton ,un 1.5%
más entrega la integral
'----- integral es sensible a los saltos, datos deben ser continuos sin saltos

```

```

If (h_inicial <= (Hm / 3) And (2 * Hm / 3) <= h_final And h_final <= Hm) Then

```

```

    delta_b = a * (rho_compactada * ((Hm / 3) - h_inicial) + rho_semicompactada * ((2 * Hm / 3) -
(Hm / 3)) + rho_nocompactada * ((Hm) - (2 * Hm / 3)))
    Cells(14, 46) = delta_b

```

```

    Dim dmdt_b(86400) As Double

```

```

    dmdt_b(1) = 1 * a * rho_compactada
    Cells(14, 44) = dmdt_b(1)

```

```

For k = 2 To (n)

```

```

    If h(k) < (Hm / 3) Then
        dmdt_b(k) = ((h(k) - h(k - 1)) / (t(k) - t(k - 1))) * a * rho_compactada
        Cells(k + 13, 44) = dmdt_b(k)

```

```

    Elseif h(k) >= (Hm / 3) And h(k) <= (2 * Hm / 3) Then

```

```
dmdt_b(k) = ((h(k) - h(k - 1)) / (t(k) - t(k - 1))) * a * rho_semicompactada
Cells(k + 13, 44) = dmdt_b(k)
```

Else:

```
dmdt_b(k) = ((h(k) - h(k - 1)) / (t(k) - t(k - 1))) * a * rho_nocompactada
Cells(k + 13, 44) = dmdt_b(k)
End If
```

Next

Ma\_b = 0

For k = 2 To (n)

```
Mj_b = 0.5 * (t(k) - t(k - 1)) * (dmdt_b(k) + dmdt_b(k - 1))
```

```
Ma_b = Mj_b + Ma_b
```

```
Cells(k + 13, 45) = Ma_b
```

Next

```
Cells(15, 46) = Ma_b
```

End If



'----- iii) h inicial segundo nivel y h final en el tercer nivel

```
If (h_inicial >= (Hm / 3) And (2 * Hm / 3) <= h_final And h_final <= Hm) Then
```

```
delta_b = a * (rho_semicompactada * ((2 * Hm / 3) - (h_inicial)) + rho_nocompactada * ((h_final) - (2 * Hm / 3)))
```

```
Cells(14, 54) = delta_b
```

```
Dim dmdt_c(86400) As Double
```

```
dmdt_c(1) = 1 * a * rho_compactada
```

```
Cells(14, 52) = dmdt_c(1)
```

For k = 2 To (n)

If  $h(k) < (2 * Hm / 3)$  Then

$dmdt\_c(k) = ((h(k) - h(k - 1)) / (t(k) - t(k - 1))) * a * rho\_semicompactada$

Cells(k + 13, 52) = dmdt\_c(k)

Else:

$dmdt\_c(k) = ((h(k) - h(k - 1)) / (t(k) - t(k - 1))) * a * rho\_nocompactada$

Cells(k + 13, 52) = dmdt\_c(k)

End If

Next

Ma\_b = 0

For k = 2 To (n)

$Mj\_b = 0.5 * (t(k) - t(k - 1)) * (dmdt\_c(k) + dmdt\_c(k - 1))$

$Ma\_b = Mj\_b + Ma\_b$

Cells(k + 13, 53) = Ma\_b

Next

Cells(15, 54) = Ma\_b

End If



'-----AL REVES " DESCARGA ": hFINAL > hINICIAL--(h\_final mayor a h\_inicial)---

----

'----- i) h inicial segundo nivel, h final primer nivel

If  $(h\_final \leq (Hm / 3) \text{ And } (Hm / 3) \leq h\_inicial \text{ And } h\_inicial \leq (2 * Hm / 3))$  Then

```
delta_a = -1 * a * (rho_nocompactada * (h_inicial - (Hm / 3)) + rho_semicompactada * ((Hm / 3) -
h_final))
```

```
Cells(14, 62) = delta_a
```

```
Dim dmdt_r(86400) As Double
```

```
dmdt_r(1) = 1 * a * rho_semicompactada
```

```
Cells(14, 60) = dmdt_r(1)
```

```
For i = 2 To (n)
```

```
  If h(i) < (Hm / 3) Then
```

```
    dmdt_r(i) = ((h(i) - h(i - 1)) / (t(i) - t(i - 1))) * a * rho_semicompactada
```

```
    Cells(i + 13, 60) = dmdt_r(i)
```

```
  Else
```

```
    dmdt_r(i) = ((h(i) - h(i - 1)) / (t(i) - t(i - 1))) * a * rho_nocompactada
```

```
    Cells(i + 13, 60) = dmdt_r(i)
```

```
  End If
```

```
Next
```

```
Ma_a = 0
```

```
For i = 2 To (n)
```

```
  Mj_3 = 0.5 * (t(i) - t(i - 1)) * (dmdt_r(i) + dmdt_r(i - 1))
```

```
  Ma_r = Mj_3 + Ma_r
```

```
  Cells(i + 13, 61) = Ma_r
```

```
Next
```

```
Cells(15, 62) = Ma_r
```

End If

'-----DESCARGA h inicial tercer nivel, h final primer nivel

If (h\_final <= (Hm / 3) And (2 \* Hm / 3) <= h\_inicial And h\_inicial <= Hm) Then

delta\_b = -1 \* a \* (rho\_compactada \* ((Hm / 3) - h\_final) + rho\_semicompactada \* ((2 \* Hm / 3) - (Hm / 3)) + rho\_nocompactada \* ((h\_inicial) - (2 \* Hm / 3)))

Cells(14, 70) = delta\_b

Dim dmdt\_rr(86400) As Double

dmdt\_rr(1) = 1 \* a \* rho\_compactada

Cells(14, 68) = dmdt\_rr(1)

For k = 2 To (n)

If h(k) < (Hm / 3) Then

dmdt\_rr(k) = ((h(k) - h(k - 1)) / (t(k) - t(k - 1))) \* a \* rho\_compactada

Cells(k + 13, 68) = dmdt\_rr(k)

Elseif h(k) >= (Hm / 3) And h(k) <= (2 \* Hm / 3) Then

dmdt\_rr(k) = ((h(k) - h(k - 1)) / (t(k) - t(k - 1))) \* a \* rho\_semicompactada

Cells(k + 13, 68) = dmdt\_rr(k)

Else:

dmdt\_rr(k) = ((h(k) - h(k - 1)) / (t(k) - t(k - 1))) \* a \* rho\_nocompactada

Cells(k + 13, 68) = dmdt\_rr(k)

End If

Next

Ma\_b = 0

For k = 2 To (n)

Mj\_b = 0.5 \* (t(k) - t(k - 1)) \* (dmdt\_rr(k) + dmdt\_rr(k - 1))

```

Ma_b = Mj_b + Ma_b
Cells(k + 13, 69) = Ma_b
Next

```

```

Cells(15, 70) = Ma_b

```

```

End If

```

```

'-----DESCARGA h inicial tercer nivel y h final segundo nivel -----

```

```

If (h_final >= (Hm / 3) And (2 * Hm / 3) <= h_inicial And h_inicial <= Hm) Then

```

```

    delta_b = -1 * a * ((rho_semicompactada * ((2 * Hm / 3) - (h_final))) + (rho_nocompactada *
((h_inicial) - (2 * Hm / 3))))

```

```

Cells(14, 78) = delta_b

```

```

Dim dmdt_rrr(86400) As Double

```

```

dmdt_rrr(1) = 1 * a * rho_compactada

```

```

Cells(14, 76) = dmdt_rrr(1)

```

```

For k = 2 To (n)

```

```

    If h(k) < (2 * Hm / 3) Then

```

```

        dmdt_rrr(k) = ((h(k) - h(k - 1)) / (t(k) - t(k - 1))) * a * rho_semicompactada

```

```

        Cells(k + 13, 76) = dmdt_rrr(k)

```

```

    Else:

```

```

        dmdt_rrr(k) = ((h(k) - h(k - 1)) / (t(k) - t(k - 1))) * a * rho_nocompactada

```

```

        Cells(k + 13, 76) = dmdt_rrr(k)

```

```

    End If

```

```

Next

```

```

Ma_b = 0

```



```

For k = 2 To (n)
Mj_b = 0.5 * (t(k) - t(k - 1)) * (dmdt_rrr(k) + dmdt_rrr(k - 1))
Ma_b = Mj_b + Ma_b
Cells(k + 13, 77) = Ma_b
Next

Cells(15, 78) = Ma_b

```

```
End If
```

```
End Sub
```

### **Sub rutina masa acumula en Agitadores**

```
Sub MtAgitador()
```

```
'Datos Agitador 1
```

```
rhopulpa1 = Cells(12, 6)
```

```
Hmax1 = Cells(12, 3)
```

```
Diametro1 = Cells(13, 3)
```

```
radio1 = ((Diametro1) / 2)
```

```
Pi = 3.1416
```

```
a1 = (Pi * (radio1) ^ (2))
```

```
h_final1 = Cells(21, 6)
```

```
h_inicial1 = Cells(21, 5)
```

```
n1 = Cells(11, 3)
```

```
'Datos agitador 2
```

```
rhopulpa_agt2 = Cells(12, 13)
```

```
Hmax2 = Cells(12, 10)
```



```

diametro2 = Cells(13, 10)
radio2 = (diametro2) / 2
a2 = (Pi * (radio2) ^ (2))
hf_agt2 = Cells(21, 13)
hi_agt2 = Cells(21, 12)
n2 = Cells(11, 10)

```

'ingreso datos h y tiempo para agitador 1

```

Dim h1(86400) As Double
Dim t1(86400) As Double

```

'para todas las altura del día Agitador 1

```

For j = 21 To (n1 + 20)
h1(j - 20) = Cells(j, 4)
t1(j - 20) = Cells(j, 2)
Next

```

'ingreso datos h y tiempo para agitador 2

```

Dim h2(86400) As Double
Dim t2(86400) As Double

```

'para todas las altura del día Agitador 2

```

For j = 21 To (n2 + 20)
h2(j - 20) = Cells(j, 11)
t2(j - 20) = Cells(j, 9)
Next

```

'-----

'Delta total AGITADOR 1



```
Delta1 = a1 * rhopulpa1 * ((h_final1) - (h_inicial1))
```

```
Cells(21, 20) = Delta1
```

```
Dim dhdt1(86400) As Double
```

```
'-Acumulación por minuto o intervalos d tiempos mas pequeños AGITADOR 1
```

```
'- primero dm/dt
```

```
dhdt1(1) = 1 * a1 * rhopulpa1
```

```
Cells(21, 18) = dhdt1(1)
```

```
For i = 2 To (n1)
```

```
dhdt1(i) = ((h1(i) - h1(i - 1)) / (t1(i) - t1(i - 1))) * a1 * rhopulpa1
```

```
Cells(i + 20, 18) = dhdt1(i)
```

```
Next
```

```
'- minuto inetgral
```

```
Ma1 = 0
```

```
For i = 2 To (n1)
```

```
Mj1 = 0.5 * (t1(i) - t1(i - 1)) * (dhdt1(i) + dhdt1(i - 1))
```

```
Ma1 = Mj1 + Ma1
```

```
Cells(i + 20, 19) = Ma1
```

```
Next
```

```
Cells(22, 20) = Ma1
```

```
'-----AGITADOR 2
```

```
Delta2 = a2 * rhopulpa_agt2 * ((hf_agt2) - (hi_agt2))
```

```
Cells(21, 28) = Delta2
```



Dim dhdt2(86400) As Double

'-Acumulación por segundo o intervalos d tiempos mas pequeños AGITADOR 2

'- primero dm/dt

dhdt2(1) = 1 \* a2 \* rhopulpa\_agt2

Cells(21, 26) = dhdt2(1)

For i = 2 To (n2)

dhdt2(i) = ((h2(i) - h2(i - 1)) / (t2(i) - t2(i - 1))) \* a2 \* rhopulpa\_agt2

Cells(i + 20, 26) = dhdt2(i)

Next

'- segundo inetgral

Ma2 = 0

For i = 2 To (n2)

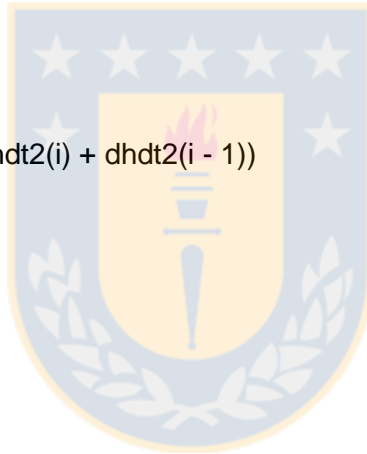
Mj2 = 0.5 \* (t2(i) - t2(i - 1)) \* (dhdt2(i) + dhdt2(i - 1))

Ma2 = Mj2 + Ma2

Cells(i + 20, 27) = Ma2

Next

Cells(22, 28) = Ma2



End Sub

# UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA

## Departamento de Ingeniería Metalúrgica

Hoja Resumen Memoria de Título

**Título:** Contribuciones para la elaboración de balance metalúrgico reconciliado en Planta de Pellets Huasco

**Nombre Memorista:** Katherine Alejandra Leal Silva

<b>Modalidad</b>		<b>Profesor(es) Patrocinante(s)</b>  Eduardo Balladares
<b>Concepto</b>		
<b>Calificación</b>		
<b>Fecha</b>	6/12/2019	
Prof. <sup>a</sup> Eugenia Araneda H.		<b>Ingeniero Supervisor:</b> Frank Zuleta
		<b>Institución:</b> Planta de Pellets Huasco

### Comisión (Nombre y Firma)

Dennis Vega G	Roberto Fustos
---------------	----------------

### Resumen

La presente memoria de título consiste en diversos aportes que permitan encauzar el balance másico en Planta de Pellet Huasco hacia un esquema de ajuste por método de multiplicadores de Lagrange. Para ello se modificaron y crearon protocolos de contrastación para asignación del orden de confianza en instrumentación y su factor de peso,  $W$ , se generaron modelos y planillas de cálculo de acumulación de material en silos y agitadores, se estudió el modelo de acumulación de inventario en espesadores y finalmente se analizó la sensibilidad de la medición del densímetro de colas al cambiar la densidad de sólido.

Las pruebas de contrastación arrojaron que el instrumento menos confiable es el densímetro de colas, con un valor de  $P=0.00$ , por lo que se le asignó, el lugar número uno, en orden de falta de confianza con un factor de peso  $W=0.5$ , seguido del pesómetro de preconcentrado con un valor de  $P=0.04$  y  $W=0.53$ ; en el tercer lugar se ubicó el pesómetro de alimentación a molino 3, con un valor de  $P=0.11$  y factor de peso correspondiente a  $W=0.57$ , en cuarto lugar se ubicó al pesómetro de pellet producto, con un  $P=0.32$  y  $W=0.71$ ; en quinto lugar el pesómetro de alimentación a molino 4 con  $P=0.41$  y cuyo factor de peso fue de  $W=0.76$  y en el primer lugar de confianza de los instrumentos contrastados se situó el flujómetro de descarga de relave con  $P=0.767$  y factor de peso  $W=1$ .

Las planillas de cálculo de acumulación de masa en silos y agitadores permiten la obtención de masa por minuto y por día, el cálculo de masa por periodos menores a un día es realizado a través de un método integral, el cual para el caso de acumulación en silos, tiene una variación entre 0.48% y 11%, respecto al método de cálculo diario, a través de un delta de altura final e inicial, por lo que para cálculos de masa menores a un día se debe tener en cuenta esta diferencia. En cuestión de acumulación de masa en agitadores, esta diferencia varía entre 4% y 8.20%. Al valor de estas masas se les asigna un factor de peso  $W=0.5$ . Para el caso de inventario en espesadores no se puede conocer la masa acumulada en estos sin antes conocer el perfil de concentración al interior.

En el análisis de sensibilización del densímetro de colas se encontró que al aumentar la densidad de sólido de la pulpa de relave disminuye el porcentaje de sólido. Por otro lado, la diferencia entre el porcentaje de sólido de cada una de las pruebas con respecto al porcentaje de sólido al GER del día, es estadísticamente significativa y la densidad de sólido de cada una de las prueba debería ser mayor a 3.1 [ton/m<sup>3</sup>], esto es mayor a la densidad de sólido usada en la calibración del densímetro.

