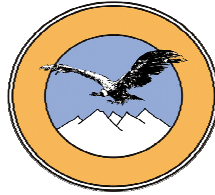


UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR

OFICINA LA PAZ



AREA DE ECONOMÍA POLITICA Y EMPRESA

CURSO DE ESPECIALIDAD EN

“Especialización Superior en Estrategias de Calidad”

2007-2008

**“Aplicación del Control Estadístico de Procesos *CEP* en
la concentración de minerales de zinc, plomo y plata en
Bolivia”**

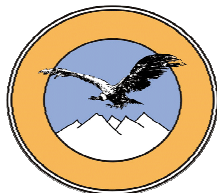
Por: Felix Toconas Mejía

La Paz – Bolivia

2008

UNIVERSIDAD ANDINA SIMÓN BOLÍVAR

OFICINA LA PAZ



AREA DE ECONOMÍA POLITICA Y EMPRESA

CURSO DE ESPECIALIDAD EN

“Especialización Superior en Estrategias de Calidad”

2007-2008

**“Aplicación del Control Estadístico de Procesos *CEP* en
la concentración de minerales de zinc, plomo y plata en
Bolivia”**

ALUMNO: Felix Toconas Mejía

TUTOR: Alejandro Vasquez

La Paz – Bolivia

2008

Al presentar esta monografía como uno de los requisitos previos para la obtención del grado de Especialista de la Universidad Andina Simón Bolívar, autorizo al centro de información o a la biblioteca de la universidad para que haga de esta monografía un documento disponible para su lectura según las normas de la universidad.

Estoy de acuerdo en que se realice cualquier copia de esta monografía dentro las regulaciones de la universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica potencial.

También cedo a la Universidad Andina Simón Bolívar los derechos de publicación de esta monografía, o de partes de ella, manteniendo mis derechos de autor, hasta por un periodo de 30 meses después de su aprobación.

Felix Toconas Mejia

La Paz 19 de Junio de 2008

RESUMEN

Las operaciones mineras en Bolivia se llevan a cabo desde los tiempos de la colonia en ciclos de producción altas y bajas, variando también estos ciclos en metales de plata-estaño- zinc. Pero, siempre en condiciones precarias de tecnología.

En la actualidad la actividad minera esta determinado por los precios internacionales de los metales, y si alguna empresa puede continuar sus operaciones con precios bajos lo hace sacrificando el número de empleados y los salarios de los mismos.

En varias plantas metalúrgicas se ha identificado que un sistema de control estadístico de procesos es necesario para:

- Controlar el proceso. Minimizando la alta variabilidad en las diferentes etapas del proceso.
- Mejorar la calidad del producto. La compañía puede obtener mejores precios.
- Mejorar la recuperación metalúrgica y controlar las penalizaciones.
- Reducir el consumo de reactivos o insumos en el proceso.

Con estas metas se propone la implementación del control estadístico de proceso, considerando:

- Toma de muestras de pulpas de minerales representativas, con la aplicación de la teoría de muestreo de minerales particulados de Pierre Gy, considerando precisiones <5%.
- Resultados de las mediciones de ensayos a las muestras de procesos validos, considerando la trazabilidad de las mismas hacia patrones nacionales del IBMETRO. Indicadores de exactitud >95% y precisión <5%.
- Gráficos de control X , R, S como base del control del proceso.
- Medición de la capacidad de los procesos Cp y Cpk, que permita mejorar el proceso. Indicadores de capacidad de proceso

Lo indicado hasta aquí es considerado como el inicio de un proceso de mejora, se sugiere y se recomienda implementación en una segunda fase:

- Las 7 herramientas básicas y administrativas de la calidad.
- Implementación de un sistema de gestión de calidad e.g. ISO 9001.
- Filosofía 6 sigma, basado en indicadores y altamente preventivo.

INDICE

1.-Antecedentes.-.....	1
2.- Planteamiento del Problema.-.....	2
2.1.- Reconocer el problema.	2
2.2.- Describir el problema.-.....	3
2.3.- Analizar la causa del problema.	4
2.4.- Explorar soluciones opcionales para el problema.	4
2.5.- Tomar una decisión para resolver el problema.....	4
3.- Justificación.-.....	5
3.1 Académica.-.....	5
3.2.- Económico Social.-.....	5
3.3.- Metodología.-.....	6
4.- Objetivos.-.....	6
4.1.- Objetivos generales.-.....	6
4.2.- Objetivos Específicos.-.....	6
5.- Alcances y limitaciones.....	7
5.1 Ámbito Geográfico.-.....	7
5.2 Límite espacial y académico.-.....	7
5.3 Instituciones relacionadas.-.....	7
6.- Contenido de la monografía.....	8
6.1.- Proceso de beneficio de minerales por flotación.-.....	8
6.1.2.- Concentración de minerales por Flotación.-.....	8
6.1.3.- Máquinas, Equipos y materiales.....	10
6.2.- Teoría del muestreo de minerales de Pierre Gy.-.....	11
6.2.1.- Generalidades.-.....	11
6.2.2.- Conceptos importantes en teoría del muestreo.	12
6.2.2.1.- Problema principal.	12
6.2.3.- Etapas de un muestreo.	13
6.2.4.- Tipos de Muestreo.	14
6.2.4.1.- Muestreo aleatorio simple.	14
6.2.4.2.- Muestreo sistemático.	14
6.2.4.3.- Muestreo estratificado.....	14
6.2.5.- Errores de muestreo de la teoría de muestreo de Pierre Gy.-.....	15
6.2.5.1.- Error de Delimitación del incremento.-.....	16
6.2.5.2.- Error del incremento de extracción.-.....	17

6.2.6.- Muestreo de flujos de pulpas de minerales	18
6.2.6.1.- objetivos de calidad de datos.-	18
6.2.6.2.- Muestreadores automáticos en flujos continuos de minerales.-.....	19
6.3.- Mediciones de las variables de proceso.....	20
6.3.1.- Analizador de metales por fluorescencia de rayos x,.....	21
6.3.2.- Trazabilidad de las mediciones.-	23
6.4.- Control Estadístico de proceso.-	25
6.4.1.- Introducción.-	25
6.4.2.- La variación.-	25
6.4.2.1.- Variaciones aleatorias o Causas No Asignables:	26
6.4.2.2.- Variaciones especiales o Causas Asignables:	26
6.4.3.- Gráfica de control.....	26
6.4.3.1.- Ventajas del uso de gráficos de control.-.....	29
6.4.3.2.- Desventajas del uso de gráficas de control.-	30
6.4.3.3.- Tipos de gráficos de control.-	30
6.4.4.- Construcción de Gráficas \bar{X} y R	31
6.4.4.1.- Creando una gráfica R en Excel.....	31
6.4.4.2.- Creando una gráfica X, R y S en Excel	35
6.4.4.3.-Gráficos \bar{X} y S.....	38
6.4.5.- Interpretación de Anomalías de las cartas de control: causas y efectos.-.	39
6.4.6.- Capacidad de proceso ó de un indicador de calidad.	42
6.4.6.1.- Índice de Capacidad Potencial (Cp):	42
6.4.6.2.- Capacidad Efectiva de proceso (Cpk).	44
7.- Propuesta, recomendaciones y conclusiones.-	47
7.1.- Propuestas.-	47
7.2.- Recomendaciones .-	48
9.- Bibliografía.....	50

Índice de figuras

Fig. No. 1.- Diagrama de flujos del proceso de beneficio o concentración de minerales de zinc, plomo y plata. Los colores en verde son los productos del proceso	9
Fig. No. 2.- El problema principal del muestreo	12
Fig. No. 3.- Muestreo de minerales quebrados.	12
Fig. No. 4.- Tipos de muestreo: a) aleatorio simple; b) aleatorio estratificado; c) sistemático rejilla rectangular.-	15
Fig. No 5.- Errores de delimitación: a) delimitación correcta; b) delimitación incorrecta ..	16
Fig. No. 6.- 3 dimensiones del flujo de pulpas a muestrear.	17
Fig. No. 7.- Una o dos dimensiones son negligentes en función al largo del flujo. La forma de la muestra es una sección del flujo..	17
Fig. No. 8.- Cortador de pulpas adecuado para minimizar los errores de extracción de un incremento.	17
Fig. No.- 9.- Principio de la fluorescencia de rayos X. Excitación inducida de los electrones y forzados a liberar energía, la cantidad de energía liberada es medida.	21
Fig. No. 10.- Principios de la fluorescencia de rayos X.	22
Fig. No 11.- Cadena de la trazabilidad de las mediciones de laboratorios de ensayos acreditados por la Dirección Técnica de Acreditación del IBMETRO.	24
Fig. No. 12.- Cadena de trazabilidad de las mediciones en el proceso de beneficio de minerales.	24
Fig. No. 13.- Ejemplo de gráfica de control..	27
Fig. No 14.- Proceso de Construcción de graficas de control iniciales..	28
Fig. No. 15.- Clasificación de gráficas de control, por el tipo de datos. En el proceso de beneficio de minerales las variables a controlar son datos variables y se trabajará con las gráficas \bar{x} y R ; \bar{x} y S	30
Fig. No 16.- Grafico de control de R para el ejemplo de mediciones de plomo.	35
Fig. No. 17.- Grafica de \bar{x} y R.	38
Fig. No. 18.- Grafico de \bar{x} y S	39
Fig. No. 19.- Grafico de capacidad de proceso, mostrando proporciones fuera de especificación y centrado..	44
Fig. No. 20.- Si las variaciones presentes no son iguales, se dice que se tiene un proceso fuera de control y no estable e impredecibles en el tiempo	45
Fig. No. 21.- Si las variaciones presentes son iguales, se dice que se tiene un proceso 'estable'. La distribución será 'predecible' en el tiempo.	46
Fig. No. 22.- Diagrama de flujo de la implementación del Control Estadístico de Proceso 48	
Fig. No. 23.- Mejora aplicando las siete herramientas de la calidad de un proceso	49
Fig. No 24.- Aplicación de las 7 herramientas de la calidad en un proceso. El CEP si bien controla el proceso no indica en forma clara donde están las variaciones atribuibles o causas asignable	49

Indice de Tablas

Tabla No. 1.- Identificación de los problemas.....	3
Tabla No. 2.- 7 errores de muestreo definidos por Pierre Gy.....	15
Tabla No 3.- objetivos de calidad de los datos del proceso.	18
Tabla. No. 4.- Administración de los procesos, antes y aplicando control estadístico de procesos:	25
Tabla No. 5.- Ejemplo de datos para la construcción de gráficos de control..	32
Tabla No. 6.- Calculo de los rangos para n= 5..	33
Tabla No. 7.- Cálculo de R.....	33
Tabla No. 8.- Tabla de constantes D_3 , D_4 , A_2 , para diferentes n.	34
Tabla No.- 9.- Calculo de \bar{X} i y s.	36
Tabla No 10.- Calculo de $\bar{\bar{X}}$ y S	37
Tabla No. 11.- Valores de los índices de capacidad de proceso (ICP) y las decisiones que se debe tomar en cada una de ellas..	44

Aplicación del Control Estadístico de Proceso *CEP* en la concentración de minerales de zinc, plomo, plata en Bolivia

1.-Antecedentes.-

El proceso de beneficio de minerales o concentración de minerales por flotación, se lleva a cabo en Bolivia en las plantas concentradoras ubicadas en los departamentos de: Potosí, Oruro y La Paz.

Todas las plantas concentradoras no tienen control de proceso que permitan medir las variaciones durante el proceso. El único control si podemos llamar control, es la auditoria al final del día con el ensayo de muestras de: alimentación, producto (concentrados de zinc y plomo) y colas o deshechos del proceso, depositadas en un dique de colas; estas mediciones lamentablemente son una autopsia a lo que paso y no permiten controlar al proceso.

Los tres requisitos para tener bajo control un proceso de beneficio de minerales son:

- **Un adecuado sistema de muestreo**, incluyendo toma de muestras representativas. Los minerales tienen características particulares que no se adecuan al muestreo de otros procesos o el muestreo estadístico.
- **Equipo de ensayo de las muestras en tiempo corto** (no mayor a 20-30 minutos), este tiempo nos permite identificar los problemas. Los ensayos clásicos de minerales no se prestan para este propósito, porque el tiempo de ensayo es de no menor a 2 horas.
- **Cartas o gráficos de control**, que indiquen los límites de la variabilidad e identificar los tipos de variabilidad.

El propósito de esta monografía es plantear una metodología para identificar los problemas del proceso, controlar el mismo y como una sugerencia en un paso posterior mejorarlos.

Control estadístico de procesos, metodología que utilizando fundamentalmente gráficos permite monitorizar la estabilidad (calidad) de un proceso de producción o de suministro de un servicio, de forma que se detecte, cuanto antes, cualquier situación inadecuada; lo

que permitirá eliminar las causas especiales de variabilidad en la obtención del resultado final¹.

La finalidad de los gráficos de control es por tanto monitorizar dicha situación para controlar su buen funcionamiento, y detectar rápidamente cualquier anomalía respecto al patrón correcto, puesto que ningún proceso se encuentra espontáneamente en ese estado de control, y conseguir llegar a él supone un éxito, así como mantenerlo; ése es el objetivo del control de calidad de procesos, y su consecución y mantenimiento exige un esfuerzo sistemático, en primer lugar para eliminar las causas asignables y en segundo para mantenerlo dentro de los estándares de calidad fijados.

Así el control estadístico de calidad tiene como objetivo monitorizar de forma continua, mediante técnicas estadísticas, la estabilidad del proceso, y mediante los gráficos de control este análisis se efectúa de forma visual, representando la variabilidad de las mediciones para detectar la presencia de un exceso de variabilidad no esperable por puro azar, y probablemente atribuible a alguna causa específica que se podrá investigar y corregir.

El interés de los gráficos de control radica en que son fáciles de usar e interpretar, tanto por el personal encargado de los procesos como por la dirección de éstos, y lo que es más importante: la utilización de criterios estadísticos permite que las decisiones se basen en hechos y no en intuiciones o en apreciaciones subjetivas que tantas veces resultan desgraciadamente falsas.

2.- Planteamiento del Problema.-

2.1.- Reconocer el problema.

¿Que sabemos acerca de este problema?.

- Problemas en la venta de concentrados, debidos a las diferencias de leyes entre producción y venta.
- Precios bajos a los concentrados, producto del proceso.
- Balances Metalúrgicos erráticos.
- No concilian leyes de planta con mina.

¹ Espinoza, Mario. (mesgar@hotmail.com). (2008, Febrero, 27). Graficas de Control. C-electrónico a esecm3@gmail.com.

- Penalizaciones por impurezas en el concentrado.

¿Podemos mejorar la calidad, variabilidad de leyes y minimizar las impurezas del producto o concentrado de minerales de zinc, plomo y plata?.

SINTOMA	CONCRETO	ABSTRACTO
Balances metalúrgicos no se ajustan.	Si	
Leyes de proceso menores a leyes de alimentación.	Si	
Ganancias de la compañía menores a lo calculado o estimado en los planes o presupuestos mensuales.	Si	
Preocupación del Superintendente General.		Si
Variaciones de leyes de concentrados en rangos muy amplios, creando problemas a comercialización en la venta de los concentrados.	Si	

Tabla No. 1.- Identificación de los problemas.

2.2.- Describir el problema.-

- Balances metalúrgicos diarios, mensuales con recuperaciones bajas o altas (fuera de rango), debido a que no existen sistemas de muestreo confiables y equipos de ensayos de minerales adecuados para el proceso. Las recuperaciones bajas indican que parte de los minerales a recuperarse en el proceso pasan hacia los desechos.
- A pesar de las mezclas que se realizan previos a la venta de concentrados, las leyes de metales no se homogeneizan o las leyes de metales que se penalizan son altas, esto significa un producto muy heterogéneo. Por lo tanto la compañía minera recibe precios menores a lo presupuestado, debido a la heterogeneidad y leyes altas de los elementos penalizados contenidos en el concentrado.
- Reacción negativa del personal de planta para resolver estos problemas.
- No concilian las leyes de producción de mina con planta concentradora.

2.3.- Analizar la causa del problema.

Analizando cronológico de las causas de los problemas, podemos indicar como causa del problema:

- Desconocimiento de equipos de muestreo adecuados.
- Falta de capacitación de personal en control de calidad.
- Falta de sistema de control de proceso.
- Falta de apoyo de la gerencia para disponer de recursos en la compra de equipos.
- Superintendencia de planta, deja las soluciones de los problemas a personal de planta, quienes se conforman con los adjetivos de *Bien, trabajamos así hace 15 años, siempre hicimos así, tuvimos muchos jefes quienes estuvieron de acuerdo con nuestro trabajo* y otros.

2.4.- Explorar soluciones opcionales para el problema.

- Implementación de sistemas de muestreos adecuados para la toma de muestras representativas en el proceso.
- Analizador de metales, para el ensayo de muestras.
- Capacitación del personal en control de calidad, importancia de que las muestras sean representativas y la no manipulación libre de los datos de proceso.
- Cultura de personal, referente al control de calidad.
- Medir los procesos con indicadores y proyectar la mejora de los procesos, con la ayuda del control estadístico de procesos.

2.5.- Tomar una decisión para resolver el problema.

- Implementación de sistemas de muestreos para pulpas.
- Analizadores de metales.
- Medir los procesos con indicadores y proyectar la mejora de los procesos, con la ayuda del CONTROL ESTADISTICO DE PROCESOS.

- Capacitación del personal en control de calidad, importancia de que las muestras sean representativas.
- Cultura de personal, referente al control de calidad.

3.- Justificación.-

3.1 Académica.-

El presente trabajo estará relacionado a:

- Herramientas para procesos de mejora I.
- Herramientas para procesos de mejora II.
- Gestión de la metrología en la empresa.
- Liderazgo Gerencial de Calidad
- Gestión por procesos.
- Planificación estratégica.

3.2.- Económico Social.-

- Minimizar las pérdidas de mineral, eso significa (\$us).
- Mejorar la recuperación metalúrgica de la planta.
- Mantener la variabilidad de:
 - leyes de alimentación,
 - leyes de descartes o colas,
 - tamaño de grano de molienda
 - y otras variables del proceso. Esto reflejará en un incremento de mineral en el producto.
- Mejor manejo de reactivos o insumos que se utilizan en el proceso, pudiendo bajar y optimar el uso de los mismos.
- Controlar las leyes de elementos penalizados en los concentrados tales como: Arsénico, antimonio, fierro y otros

3.3.- Metodología.-

Método de investigación será deductivo.

'La deducción va de lo general a lo particular. El método deductivo es aquél que parte los datos generales aceptados como valederos, para deducir por medio del razonamiento lógico, varias suposiciones, es decir; parte de verdades previamente establecidas como principios generales, para luego aplicarlo a casos individuales y comprobar así su validez'².

Se puede decir también que el aplicar el resultado de la inducción a casos nuevos es deducción.

4.- Objetivos.-

4.1.- Objetivos generales.-

- Cambiar la cultura de los procesos de un control empírico de las respuestas **bien, tenemos controlado, siempre trabajamos así, no perdimos dinero en los últimos 15 años**; a las preguntas de: ¿Cómo esta tu proceso de beneficio de minerales?, ¿Pierdes dinero?. Cuanto significa el **bien, tenemos bajo control**; no existen indicadores; todos ellos son empíricos o de intuición.

4.2.- Objetivos Específicos.-

- Implementación de sistemas de muestreos para control de proceso. Obteniendo muestras representativas.
- Analizador de metales, para ensayo de muestras.
- Ensayo confiable, que permitan obtener datos reales. La trazabilidad de las mediciones es una forma de emitir resultados confiables y válidos.
- Capacitación del personal en control de calidad, importancia de que las muestras sean representativas y la no manipulación libre de los datos de proceso.
- Cultura de personal, referente al control de calidad.
- Indicador de proceso y proyectar la mejora de los mismos

² Metodología de la investigación. (on line). Internet. 20 de Mayo 2008. disponible: <http://iteso.mx/~gpocovi/apuntes%20metinv/metodos.doc>

5.- Alcances y limitaciones

5.1 Ámbito Geográfico.-

Las plantas metalúrgicas en Bolivia se encuentran distribuidas en diferentes lugares de los departamentos de: Potosí, Oruro, La Paz; pertenecen a compañías mineras medianas, pequeñas y cooperativas; muchas de ellas tratan minerales de producción propia y otras minerales de compra.

5.2 Límite espacial y académico.-

- Pierre's Gy Sampling Theory, and Sampling Practice,
- Introducción al muestreo de minerales.
- Guidance for Obtaining Representative Laboratory Analytical Subsamples from Particulate Laboratory Samples
- Herramientas para procesos de mejora I.
- Herramientas para procesos de mejora II.
- Gestión de la metrología en la empresa.
- Liderazgo Gerencial de Calidad
- Gestión por procesos.
- Planificación estratégica.

5.3 Instituciones relacionadas.-

Cada compañía minera en sus respectivos departamentos de:

- Departamento de comercialización de minerales y concentrados.
- Departamento de finanzas.
- Departamento de producciones.
- Gerencia General.

6.- Contenido de la Monografía

6.1.- Proceso de beneficio de minerales por flotación.-

La explotación de minerales de plomo, plata y zinc en Bolivia, se explota mediante la minería subterránea en vetas delgadas y de alta ley de metálico. En el proceso de extracción los metales de interés económico bajan su ley, la cual no es posible vender en el mercado internacional; por esta razón se debe procesar en plantas concentradoras para incrementar las leyes de los metálicos contenidos en minerales.

Este proceso se llama concentración de minerales por flotación.

6.1.2.- Concentración de minerales por Flotación.-

La recuperación de metales ha sido un desafío para el hombre, que se desarrollo casi paralelamente con su evolución. Así se conoce muchas fases del conocimiento humano según el uso de los metales (o minerales) tal como la edad de piedra, un poco mas evolucionados cuando se habla de la edad de hierro cobre y bronce. El método más rudimentario sin duda ha sido simple selección manual de los materiales de interés.

Las plantas de beneficio de minerales en Bolivia, debido a las características mineralógicas de los minerales de zinc, plomo y plata son adecuadas para usar la tecnología de flotación; este proceso incrementa las leyes de los minerales desde 3 - 7 % de zinc hasta 50 - 60% de zinc; 0,8 - 5% hasta 50 - 70 % de plomo y 100-500 g/ton hasta 5000 – 10000 g/ton de plata.

Las operaciones de flotación, como un proceso de concentración, tienen como objetivo la recuperación de los metales de interés, contenido en un mineral, en forma impura pero al mismo tiempo enriquecida. En este tipo de operaciones se basan en las características hidrofóbicas de ciertos componentes de los minerales (típicamente el azufre) a efectos, que al introducir aire se forme burbujas (flotación por espumas) y estas partículas de mineral se adhieran a las burbujas y floten a la superficie donde son extraídos como concentrados.

El flujograma de la fig. No. 1, muestra el proceso de beneficio de minerales por flotación.

La flotación muchas veces requiere de cierta inducción por reactivos, aunque inicialmente la flotación era una operación recomendada solo para minerales sulfurados hoy por hoy, y

desde hace mucho es posible flotar minerales oxidados debido a la aplicación y uso de reactivos que dan características hidrofóbicas a los elementos de interés en la mena.

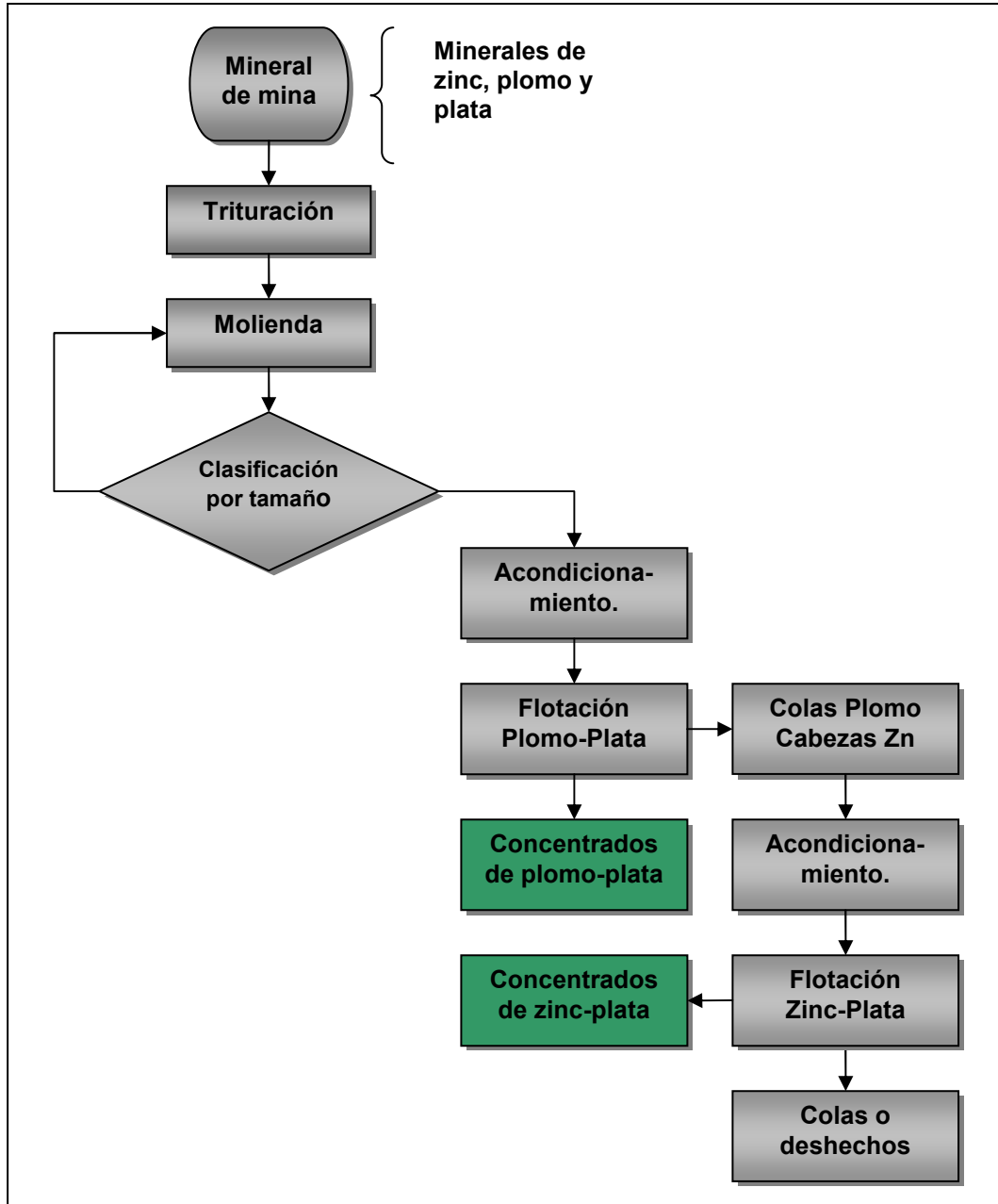


Fig. No. 1.- Diagrama de flujos del proceso de beneficio o concentración de minerales de zinc, plomo y plata. Los colores en verde son los productos del proceso.

Reactivos

Los principales reactivos a usarse en las operaciones y proceso de flotación son, en forma genérica, los siguientes:

- **Depresores.** Son reactivos que bien a ciertos elementos a fin de que no floten durante la operación, es decir que se mantienen debajo de la línea de espuma. Este tipo de reactivos se usan en la flotación diferencial o selectiva o simplemente para evitar que se sumen al concentrado de elementos indeseables.
- **Colectores.** Contrariamente a los depresores los colectores se usan a fin de que los elementos valiosos puedan adherirse a la superficie de las burbujas, de manera tal que sea justamente los elementos concentrados como producto.
- **Espumantes.** Este tipo de reactivos son aquellos que producen las espumas por el ingreso de aire, formándose burbujas lo suficientemente fuertes y estables.

En general los reactivos a usarse, así como su dosificación, dependen de las características propias de cada mineral.

6.1.3.- Máquinas, Equipos y materiales.

Una operación de flotación convencional usualmente requiere de los siguientes equipos:

- Chancadora de quijada (primaria).
- Zaranda vibratoria.
- Faja transportadora.
- Chancadora Cónica o de quijada (secundaria).
- Faja transportadora.
- Tolva de finos.
- Molino de bolas.
- Clasificador (helicoidal sin fin o hidrociclón).
- Celdas de flotación (en banco o unitarias)
- Espesadores.

- Filtros.

6.2.- Teoría del muestreo de minerales de Pierre Gy.-

6.2.1.- Generalidades.-

¿Existe una decisión importante en un proyecto u operación minera, pero tan solo una la cual de una u otra manera, directa o indirectamente esta basada sobre alguna forma de ley ensayada, o en otros términos en una muestra mineral? Y quién, es responsable por las consecuencias devastadoras de la mala toma de muestras? (P. Gy)³.

En la industria minera, la importancia de que una muestra de mineral sea representativa radica en la influencia que proporcionan los resultados de ensayos que se practiquen sobre ello; y las discrepancias en el material pueden conducir a conclusiones erróneas afectando con ello la interpretación de los resultados. Por lo tanto, si la muestra obtenida no representa con exactitud al mineral que proviene de los análisis o los resultados de los ensayos obtenidos a partir de estas muestras tendrán escaso o ningún valor.

La suposición es que las muestras representan a la población en forma precisa y exacta. Sin esta suposición, el muestreo podría ser el punto mas débil dando paso a errores más grandes en el proceso de medición.

El buen muestreo es la base de buenos datos, buena interpretación y conclusiones viables. Personal calificado debería estar envuelto en el diseño, planificación y supervisión del programa de muestreo.

Y, finalmente como mencionamos al principio casi todas las decisiones que se hacen respecto de un proyecto u operación minera, desde la exploración hasta el cierre de la mina; están basadas en valores obtenidos de material muestreado. Estas decisiones significan millones de dólares o la vida de la operación minera.

³ Pittard, F. Francis, Pierre Gy's Sampling Theory and Sampling Practice, CRC press.USA. 1993. 25 p.

6.2.2.- Conceptos importantes en teoría del muestreo.

6.2.2.1.- Problema principal.

La figura 3, resume el problema principal del muestreo: estimar la media de una población (con N elementos) ó lote (de tamaño M_L) a partir de una muestra (de tamaño n ó M_S)⁴:

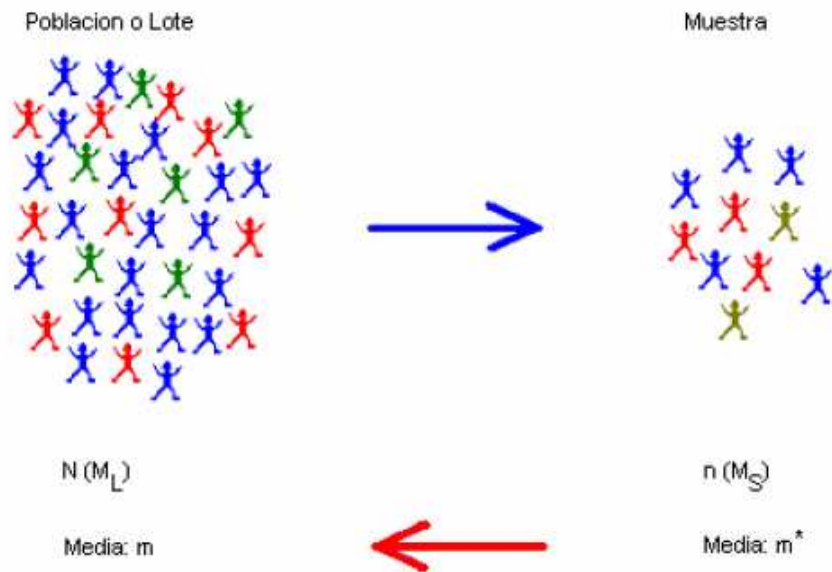


Figura No. 2.- El problema principal del muestreo.

En general, el muestreo exhaustivo, es decir tomar los N datos ó la masa total M_L (llamado a veces censo) es muy difícil y de alto costo.

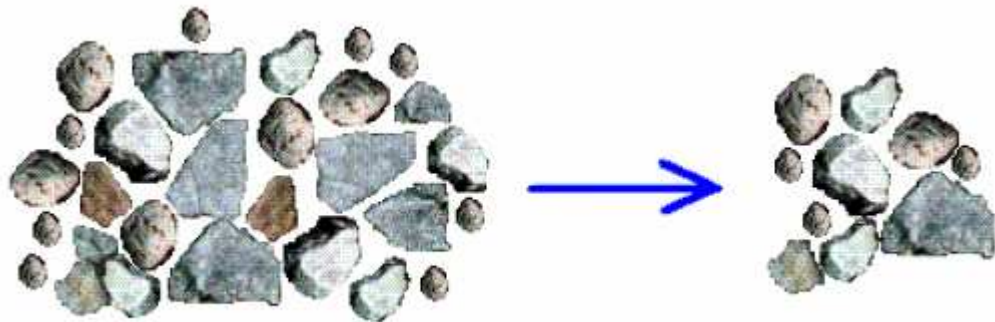


Figura No. 3.- Muestreo de minerales quebrados.

⁴ Alfaro, M. Antonio. "Introducción al muestreo minero". (2002). (online). Internet.. 20 Julio 2006.

El muestreo de minerales muestra la diversidad de: tamaños, formas, pesos, composiciones y calidades de la población a muestrearse Figura 3.

El muestreo **estadístico** es diferente del **muestreo de minerales**:

- En el muestreo estadístico, el lote ó población está compuesto por objetos de igual peso.
- En el muestreo de minerales; el lote está compuesto de objetos de diferentes pesos, formas, composición y tamaño.

6.2.3.- Etapas de un muestreo.

En todo muestreo, debe estar bien establecido lo siguiente:

1. Objetivo del muestreo.
2. Población a muestrear
3. Datos a recolectar
4. Manera de recolectar los datos
5. Grado de precisión deseado
6. Método de medida.

Para cumplir bien con la definición inicial de muestreo, se debe cumplir el hecho siguiente, de vital importancia:

El muestreo debe ser equiprobable

En el caso de los minerales: el muestreo de un lote M_L compuesto de N fragmentos es **equiprobable** cuando **todas** las combinaciones de n fragmentos tienen la **misma probabilidad** de ser elegidos para la constitución de la muestra (M_s es la muestra con n fragmentos).

Según Pierre Gy, creador de la teoría moderna del muestreo de minerales, cuando la condición de equiprobabilidad no se cumple, se tiene más bien un “**espécimen**” (un ejemplar) en vez de una muestra.

Ejemplos de muestreos que no son equiprobables:

- Los muestreos de carros ó de material estéril en minería, por lo general, no son equiprobables, porque se está obligado a tomar una muestra superficial.
- En muestreo estadístico, tomar voluntarios constituye un muestreo no equiprobable (ejemplo: test de drogadictos).

6.2.4.- Tipos de Muestreo.

Los principales tipos de muestreo son los siguientes:

6.2.4.1.- Muestreo aleatorio simple.

Consiste en la selección de n fragmentos ó unidades del lote M_L de modo que **todas las muestras posibles de tamaño n tengan la misma probabilidad de ser elegidas.**

Ejemplo:

En la fundición de Vinto hay 100 lingotes de Estaño (numerados) para ensayo. Se sortean (con una tabla de números aleatorios) 5 lingotes y se envían para ensayo al laboratorio. Se ensayan por: Cu, Pb, Zn, Ni, Mn, Fe, Ag, P, Sb, In, Al, Cd, Co, Cr, Bi, Sn.

6.2.4.2.- Muestreo sistemático.

En este caso las extracciones de las muestras son determinadas según una regla fija. Basados en tiempo, tonelaje o distancia.

Ejemplos:

- Tomar canaletas en una galería cada 2 metros.
- En una cinta transportadora, tomar una muestra cada 10 minutos.

6.2.4.3.- Muestreo estratificado.

El lote M_L se divide en partes o estratos que no se solapan entre sí. Cada estrato es muestreado posteriormente según los procedimientos anteriores. O en otras palabras es el muestreo en el cual el universo a estudiar se divide en varias capas o estratos, siendo estos muestreados al azar y por separado, considerando las proporciones de los estratos.

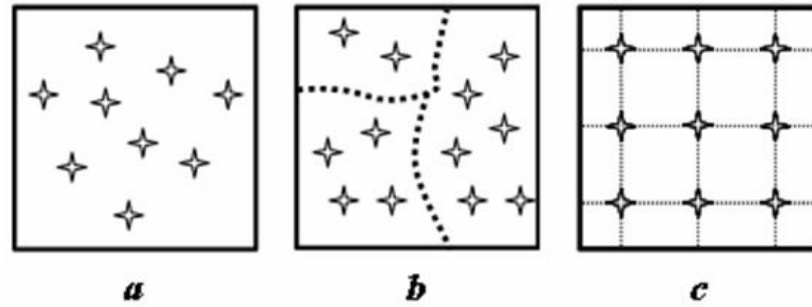


Figura No. 4.- Tipos de muestreo: a) aleatorio simple; b) aleatorio estratificado; c) sistemático rejilla rectangular.

6.2.5.- Errores de muestreo de la teoría de muestreo de Pierre Gy.-

Tipo de Error	Causa	Forma de Minimización
Fundamental	Pérdida de precisión en la muestra, debido a su composición física y química (p. ej. Distribución de tamaño de partícula)	Disminución del diámetro de las partículas mas grandes o aumento de la masa de la muestra
Segregación y agrupación	Se debe a la distribución no al azar de partículas, usualmente por efecto de la gravedad.	Preparación al azar de muestras compuestas u homogeneización y fraccionamiento de la muestra.
Heterogeneidad de largo alcance	Error espacial fluctuante y no al azar	Toma de muchos incrementos para formar una muestra.
Heterogeneidad periódica	Error de fluctuación temporal o espacial.	Generación correcta de muestras compuestas.
Delimitación de incrementos	Diseño de muestreo inapropiado y/o mala selección de equipo.	Diseño del muestreo y selección apropiada de equipo.
Extracción de incrementos	El procedimiento de muestreo falla en cuanto a la extracción precisa del incremento de una muestra	Indispensable contar con protocolos adecuados y equipo de muestreo bien diseñado.
Preparación	Se debe a pérdidas, contaminación y/o alteración de una muestra	Existen técnicas de campo y laboratorio para evitar el problema

Tabla No. 2.- Los 7 errores de muestreo definidos por Pierre Gy, los errores en anaranjado tienen el mayor aporte a la variabilidad y consideramos para el diseño de equipos.⁵

⁵ Nocerino, M. Jhon, Gerlach, W. Robert. "Guidance for obtaining representative laboratory analytical subsample from particulate samples". (2003). (online). Internet. Agosto 2006.

La teoría de muestreo para minerales desarrollado por Pierre Gy, define 7 principales errores (Ver tabla No. 2).

Estos siete errores se deben a las características de heterogeneidad, forma, peso específico, tamaño, distribución de minerales en las partículas, delimitación, extracción y preparación de las muestras.

6.2.5.1.- Error de Delimitación del incremento.-

La delimitación de una muestra está íntimamente relacionada con la representatividad de la misma. La delimitación significa que el volumen seleccionado de muestra en el incremento a obtener da oportunidad a cada componente de la población a ser parte de la muestra o el incremento.

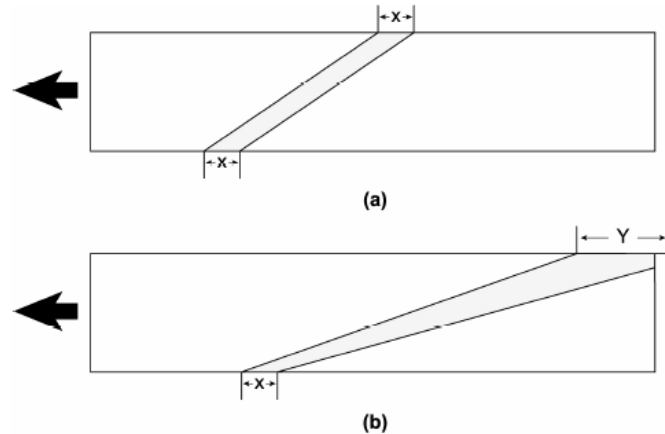


Fig. No 5.- Errores de delimitación: a) delimitación correcta; b) delimitación incorrecta.⁶

Un flujo de pulpas de minerales se puede considerar de 3 dimensiones (Ver fig. 6), debido a que los ductos de las pulpas tienen forma cilíndrica y el flujo de pulpas toma esta forma. Pero, una de las dimensiones 'X' es muy larga en comparación con las otras dos, haciendo que las dimensiones 'Y' y 'Z' sean negligentes y asumir que el flujo tiene una sola dirección (Fig. 7); con esta observación la forma de la muestra a tomar es una tajada o una sección del flujo de altura o largo en función del tamaño de grano y el volumen de flujo.

⁶ Sampling theory, sampling practices and their economic impact. Office of special programs & continuing education. Colorado School of Mines. October 17-20, 2006. Golden, Colorado USA.

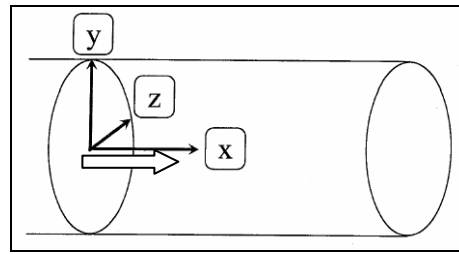


Figura No. 6.- 3 dimensiones del flujo de pulpas a muestrear

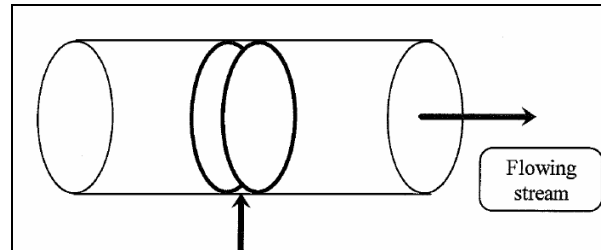


Figura No. 7.- Una o dos dimensiones son negligentes en función al largo del flujo. La forma de la muestra es una sección del flujo.

6.2.5.2.- Error del incremento de extracción.-

El error del incremento de extracción es de vital importancia en el muestreo minero y básicamente se refiere a la recuperación de la muestra o incremento delimitado anteriormente. En otras palabras la diferencia entre lo que se debe extraer y lo que se extrae.

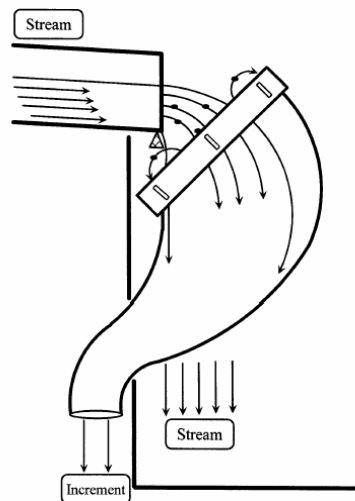


Fig. No. 8.- Cortador de pulpas adecuado para minimizar los errores de extracción de un incremento.

6.2.6.- Muestreo de flujos de pulpas de minerales.-

El beneficio de minerales tiene como todo proceso:

- Alimentación de minerales o entradas de materia prima.
- Procesos Internos, conversión de la materia prima.
- Salidas: Productos y desechos o colas

Las pulpas de minerales son transportados a lo largo de todo el proceso en tuberías de diferentes diámetros y la forma de los flujos es la de la tubería con porcentajes de sólidos desde 20% hasta 66 %.

Para propósitos de control de proceso es necesario instalar 5 muestreadores en:

1. Alimentación.
2. Colas plomo (control intermedio).
3. Concentrados de zinc.
4. Concentrados de plomo.
5. Colas finales o desechos del proceso.

6.2.6.1.- Objetivos de calidad de datos.-

Objetivos de calidad	Objetivos de calidad de proceso
Objetivo del muestreo.	Control de proceso
Población a muestrear	Pulpas de minerales, % sólidos varían de 20-66%.
Datos a recolectar	Valores de contenidos metálicos.
Manera de recolectar los datos	Cortadores de pulpas, vezin.
Grado de precisión deseado	<5%
Método de medida	Ensayo vía XRF de: Zn, Pb, Ag, Fe, Sn, S y otros

Tabla No 3.- objetivos de calidad de los datos del proceso.

La razón por la cual las muestras son tomadas es hacer algunas determinaciones del lote (e.g., un sitio altamente mineralizado). Las metas y objetivos del estudio determinan las características estadísticas aceptables para el estudio. Si una decisión depende de los

resultados analíticos, entonces es determinar que tipos de medidas son necesarias y cuan exactas y precisas deberán ser⁷.

6.2.6.2.- Muestreadores automáticos en flujos continuos de minerales.-

Los Muestreadores automáticos son equipos cuyo objetivo básico es:

- Obtener una muestra representativa de un flujo de material húmedo o seco y de una amplia gama de tamaños granulométricos.
- Están diseñados para tomar la muestra, cortando la totalidad del flujo en ángulo recto con respecto a él, mientras está en movimiento y en caída libre. Con esto, se evita el efecto negativo de variables, tales como: la segregación del material en las correas transportadoras o el asentamiento de las partículas en pulpas minerales.

Los tipos de cortadores o muestreadores que se emplearan son:

- Muestreadores de Trayectoria Recta. Muestreo primario
- Muestreadores Rotatorios Tipo Vezin. Muestreo secundario.

Las principales características de estos equipos son las siguientes:

- La velocidad de la Cuchara cortadora a través del flujo es constante.
- La abertura de la Cuchara cortadora es fija o regulable, para efecto de adecuarla a la cantidad de material a muestrear y variaciones en el tamaño granulométrico.
- La Cuchara muestreadora posee un sistema de descarga rápida, para prevenir que se sobrecargue mientras atraviesa el flujo.
- El Cortador de muestra se desplaza a una velocidad constante y a intervalos de tiempo tales, que la muestra tomada sea absolutamente representativa.

Velocidad de corte.

- La velocidad lineal o circular del cortador debe ser constante durante todo el tiempo necesario para cruzar el flujo.
- La velocidad permanece constante durante la colección de todos los incrementos.

⁷ Nocerino, M. Jhon, Gerlach, W. Robert. "Guidance for obtaining representative laboratory analytical subsample from particulate samples". (2003). (online). Internet. Agosto 2006.

- La velocidad del cortador debe ser inferior a 45 cm/seg.
- El cortador debe alcanzar una velocidad constante antes de empezar a cortar el flujo.

Extracción correcta de los incrementos.

- Paralelismo de las hojas del cortador: los labios deben ser perfectamente paralelos.
- Espesor de las hojas del cortador: el espesor de las hojas del cortador no introduce ningún error y no altera la probabilidad de extracción.
- La forma del borde de las hojas del cortador (simetría): Se sugiere que el ángulo superior del borde de las cuchillas del cortador sea menor a 45° (ángulo “filudo”).
- Si los bordes son gruesos por razones mecánicas, ellos deben ser perfectamente simétricos.

Inclinación del cortador de muestra.

- La inclinación de los bordes del cortador debe ser perpendicular al flujo a muestrear.
- Esto es correcto en la medida que todos los fragmentos que rebotan y que pertenecen al incremento, caigan dentro de la abertura del cortador.
- Con estas consideraciones se debe evitar utilizar cuchillos verticales, ya que ellos generaría un sesgo en la delimitación del incremento.

6.3.- Mediciones de las variables de proceso.

Una vez obtenida una muestra representativa ‘requisito indispensable para tener bajo control un proceso de beneficio de minerales’, podemos considerar el ensayo de las mismas como un segundo paso.

El ensayo de muestras, es la medición del contenido metálico a beneficiarse en el mineral o en otras palabras los mensurados.

El proceso de beneficio de minerales requiere que los resultados de las mediciones sean inmediatos para controlar la variabilidad de los contenidos de metales en la alimentación, procesos intermedios y los productos finales. El equipo adecuado que no requiere de los ensayos clásicos destructivos de la muestra y la presencia de personal químico calificado es el analizador de metales de fluorescencia de rayos x.

6.1.3.1.- Analizador de metales por fluorescencia de rayos x,

Los espectros de rayos X característicos se excitan cuando se irradia una muestra con un haz de radiación X de longitud de onda suficientemente corta. Las intensidades de los rayos X fluorescentes resultantes son casi 1000 veces más bajas que la de un haz de rayos X obtenido por excitación directa con electrones. El método de fluorescencia requiere de tubos de rayos X de alta intensidad, de unos detectores muy sensibles y de sistemas ópticos de rayos X adecuados.

La intensidad es un factor importante, puesto que afectará al tiempo que se necesitará para medir el espectro. Es necesario que sean detectados y recibidos un determinado número de cuantos en el detector para que el error estadístico de la medición se reduzca lo suficiente. La sensibilidad del análisis, contemplada como la concentración detectable más baja de un determinado elemento en la muestra, dependerá de la relación pico-radiación de fondo para las líneas espectrales. Se presentan pocos casos de interferencia espectral, debido a la relativa simplicidad de los espectros de rayos X.

Cuando se irradia con un haz de rayos X una muestra de composición desconocida, esta emitirá las radiaciones características de los elementos que la componen. Si podemos identificar la longitud de onda o energía de cada una de estas radiaciones características, podremos conocer los elementos que componen la muestra, y si podemos medir sus intensidades, podremos conocer sus respectivas concentraciones.

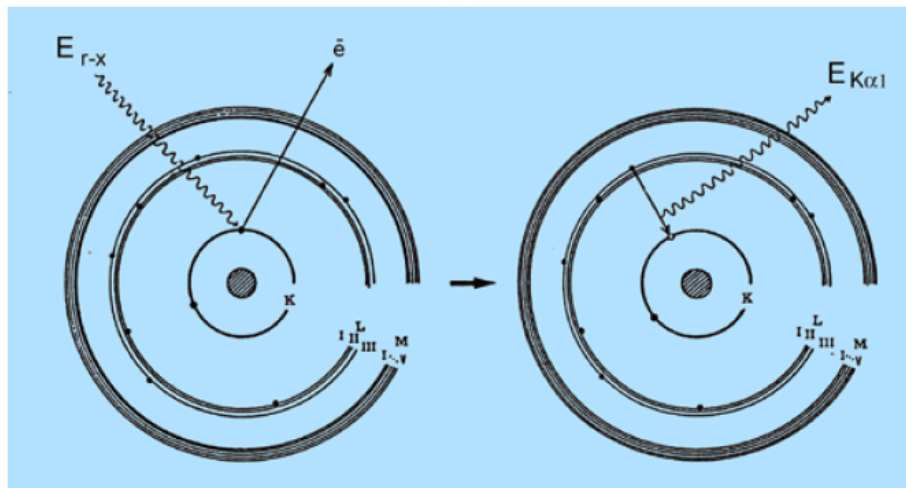


Fig. No.- 9.- Principio de la fluorescencia de rayos X. Excitación inducida de los electrones y forzados a liberar energía, la cantidad de energía liberada es medida.

El sistema general para la excitación, dispersión y detección de la radiación fluorescente con un espectrómetro de cristal plano se muestra en la figura No 10. En él, se dispone la muestra en el portamuestras, que se suele hacer girar para mejorar la uniformidad de exposición, y se irradia con un haz de rayos X primarios sin filtrar, lo que provoca que el elemento presente emita sus líneas fluorescentes características. Una porción del haz fluorescente dispersada es colimada por una rendija de entrada al goniómetro y dirigida a una superficie plana del cristal analizador. Las líneas de radiación, reflejadas de acuerdo con la ecuación de Bragg, pasan a través de un colimador auxiliar o rendija de salida hacia el detector, en donde la energía de los cuantos de rayos X se convierte en impulsos eléctricos o conteos. La rendija primaria, el cristal analizador y la rendija secundaria están colocados en el círculo focal, de manera que la Ley de Bragg siempre se cumple durante la rotación del goniómetro, ya que el detector gira a una velocidad angular el doble de la del cristal.

XRF - CONVENCIONAL

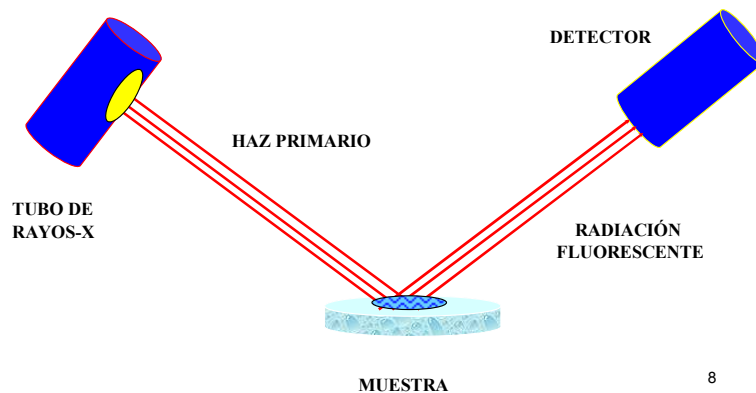


Fig. No. 10.- Principios de la fluorescencia de rayos X.⁸

Para poder excitar una radiación fluorescente es necesario que la radiación primaria tenga una longitud de onda menor que la arista de absorción de las líneas del espectro deseado, de modo que la radiación continua puede ser válida para ello. En el análisis

⁸ Hugo Guerrero. Ref: Lecturas curso control de calidad, Fluorescencia de rayos x. Disponible en: http://www.uned.es/cristamine/mineral/minbas_mrc.htm

cualitativo, por lo general es deseable trabajar con el voltaje más alto posible en el tubo de rayos X, con el objeto de asegurar que el mayor número de elementos de la muestra produzcan una excitación fluorescente. Esto también garantizará la máxima intensidad de fluorescencia para cada elemento en el análisis cuantitativo. Sin embargo, en los dos casos, el tubo de rayos X debe tener un voltaje un poco menor que el máximo obtenible, si se desea emplear condiciones de excitación selectiva para no obtener la fluorescencia de todos los elementos presentes sino los que interesan, o cuando se vayan a excitar líneas de longitud de onda muy largas, con objeto de reducir al mínimo la dispersión de la radiación primaria a través del sistema, manteniendo baja la intensidad del espectro continuo de longitud de onda corta.

6.3.2.- Trazabilidad de las mediciones.-

La calidad de los patrones esta definida por su punto de inserción en la denominada cadena metrológica. Los eslabones de esa cadena son las *medidas materializadas, los instrumentos y sistemas de medición, los materiales de referencia*, que tiene por objeto definir, materializar, conservar o reproducir una unidad, o un valor de una magnitud, para transmitirlo por comparación a los otros elementos de la cadena que le siguen. En la definición de trazabilidad del VIM esta implícita de que la incertidumbre de un elemento de esta cadena, es siempre mayor que la incertidumbre de los elementos superiores. Si la cadena se rompe en cualquier eslabón superior, la trazabilidad se pierde completamente.⁹

La confiabilidad y validez de los resultados de las mediciones ensayadas en nuestro equipo de fluorescencia de rayos X, solo es posible verificando la trazabilidad de los valores de ensayos hacia patrones nacionales y patrones internacionales.

En Bolivia, la cadena de trazabilidad para mediciones químicas en minerales esta establecida por el DTA (dirección técnica de Acreditación del IBMETRO), mediante intercomparaciones laboratoriales.

⁹ Especialización superior en estrategias de calidad, Módulo 6: Gestión Metrológica en las empresas. Juan Carlos Castillo, 2008.

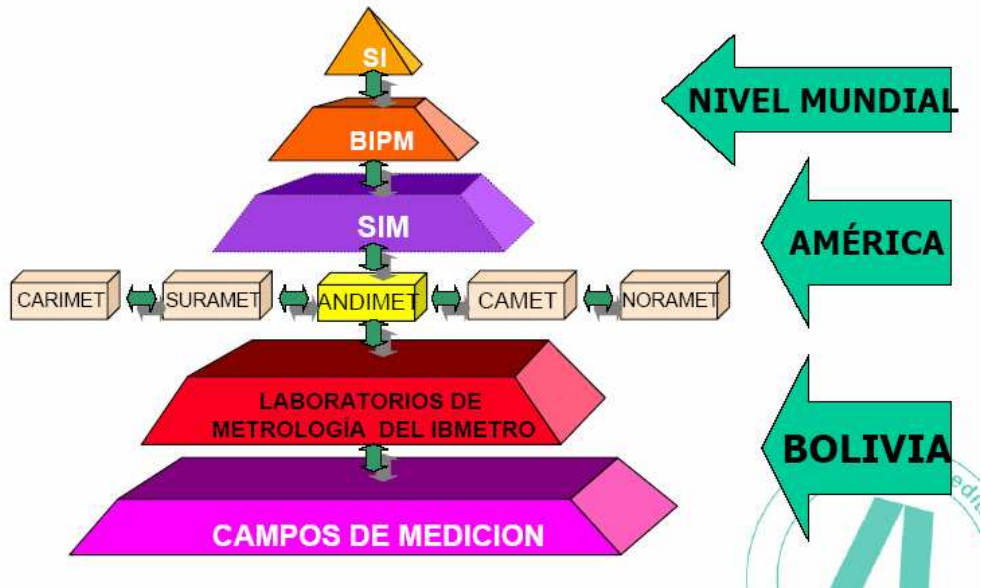


Fig. No 11.- Cadena de la trazabilidad de las mediciones de laboratorios de ensayos acreditados por la Dirección Técnica de Acreditación del IBMETRO.¹⁰

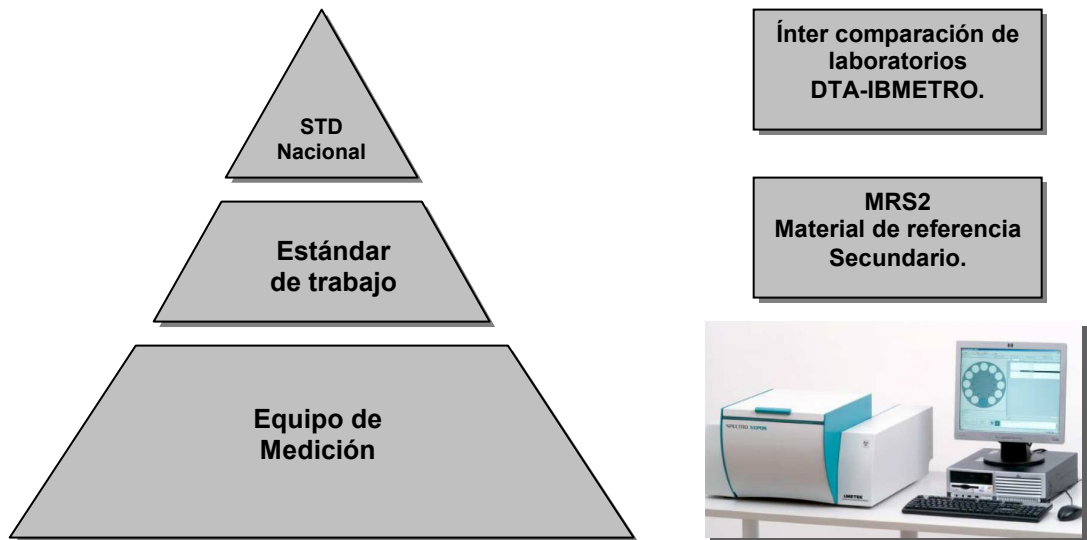


Fig. No. 12.- Cadena de trazabilidad de las mediciones en el proceso de beneficio de minerales.

¹⁰Hugo Guerrero, Curso “Control interno de la calidad de los resultados en laboratorios de ensayos” [Diapositiva]. La Paz-Bolivia, IBMETRO, 2005. 25, diapositivas, col.

6.4.- Control Estadístico de proceso.-

6.4.1.- Introducción.-

El término '*proceso*' se utiliza como una combinación de máquinas, herramientas, métodos, materiales y personas empleadas para obtener una calidad especificada para un determinado producto o servicio.

El control estadístico de proceso se define:

Control = Lograr que el proceso se comporte de la manera que deseamos.

Estadístico = por medio de usos de datos (Información).

Procesos= Entradas – Pasos – Salidas.¹¹

Antes	Ahora
Intuición	Datos
Promedio	Variación
Salidas	Entradas
Costo de Productividad	Calidad de servicio

Tabla. No. 4.- Administración de los procesos, antes y aplicando control estadístico de procesos.

6.4.2.- La variación.-

Uno de los axiomas o verdades evidentes de la fabricación es que nunca se producen dos objetos que sean exactamente iguales, En realidad esta idea de la variación es una ley inherente a la naturaleza, en donde no hay dos seres que pertenezcan a la misma categoría que sean exactamente iguales. La variación puede ser grande y evidente, como es el caso de la diferente altura de los seres humanos, o insignificante, como el peso de los marcadores con punta de fieltro, o la forma de los copos de nieve. Si las variaciones son muy pequeñas, los objetos darán la impresión de que son idénticos; sin embargo, mediante instrumentos de precisión se hará patente la diferencia. Si dos objetos dan la impresión de medir lo mismo, se debe a las limitaciones de los instrumentos de medición empleados. Conforme se han ido mejorando éstos, las diferencias han persistido, aunque

¹¹ Especialización Superior en Estrategias de la calidad, Modulo VII: Herramientas para procesos de mejora. Mario espinoza,. Febrero 2008.

el aumento en la variación ha cambiado. Antes de controlarla, hay que estar en condiciones para medir la variación.¹²

Las variaciones del proceso se pueden rastrear por dos tipos de causas

- 1) Común o (aleatoria), que es inherente al proceso
- 2) Especial (o atribuible), que causa una variación excesiva.

6.4.2.1.- Variaciones aleatorias o Causas No Asignables: Son una multitud de causas no identificadas, ya sea por falta de medios técnicos o porque no son identificadas, ya sea por falta de medios técnicos o porque no es económico hacerlo, cada una de las cuales ejerce un pequeño efecto en la variación total. Son inherentes al proceso mismo y no pueden ser reducidas o eliminadas a menos que se modifique el proceso.

6.4.2.2.- Variaciones especiales o Causas Asignables: Son causas que pueden ser identificadas y que conviene descubrir y eliminar, por ejemplo, una falla de la máquina por desgaste de una pieza, un cambio muy notorio en la calidad del plástico, etc. Estas causas provocan que el proceso no funcione como se desea y por lo tanto es necesario eliminar la causa, y retornar el proceso a un funcionamiento correcto.

6.4.3.- Gráfica de control.

Un proceso de control es aquel cuyo comportamiento con respecto a variaciones es estable en el tiempo.

Las graficas de control se utilizan en la industria como técnica de diagnósticos para supervisar procesos de producción e identificar inestabilidad y circunstancias anormales.

Una gráfica de control es una comparación gráfica de los datos de desempeño de proceso con los 'límites de control estadístico' calculados, dibujados como rectas limitantes sobre la gráfica. Los datos de desempeño de proceso por lo general consisten en grupos de mediciones que vienen de la secuencia normal de producción y preservan el orden de los datos.

Las graficas de control constituyen un mecanismo para detectar situaciones donde las causas asignables pueden estar afectando de manera adversa la calidad de un producto.

¹² Dale H. Besterfield, *Control de calidad*, México, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1994, p 105.

Cuando una gráfica indica una situación fuera de control, se puede iniciar una investigación para identificar causas y tomar medidas correctivas.

Nos permiten determinar cuándo deben emprenderse acciones para ajustar un proceso que ha sido afectado por una causa especial. Nos dicen cuando dejar que un proceso trabaje por sí mismo, y no malinterpretar las variaciones debidas a causas comunes. Las causas especiales se deben contrarrestar con acciones correctivas. Las causas comunes son el centro de atención de las actividades permanentes para mejorar el proceso.

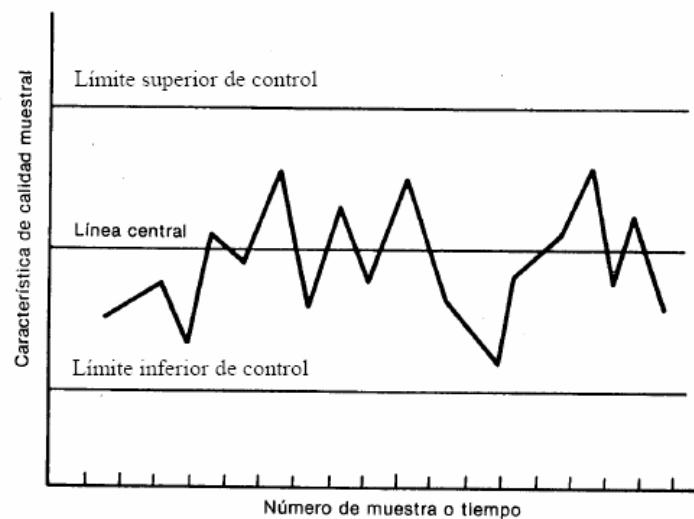


Fig. No. 13.- Ejemplo de gráfica de control

El objetivo de una gráfica control no es lograr un estado de control estadístico como un fin, sino reducir la variación.

Un elemento básico de las gráficas de control es que las muestras del proceso de interés se han seleccionado a lo largo de una secuencia de puntos en el tiempo. Dependiendo de la etapa del proceso bajo investigación, se seleccionara la estadística mas adecuada.

Además de los puntos trazados la grafica tiene una línea central y dos limites de control.

Si todos los puntos de la grafica se encuentran entre los dos limites de control se considera que el proceso esta controlado. Una señal fuera de control aparece cuando un punto trazado cae fuera de los límites, lo cual se atribuye a alguna causa asignable y entonces comienza la búsqueda de tales causas.

Establecer una gráfica de control requiere los siguientes pasos (fig. No . 14):

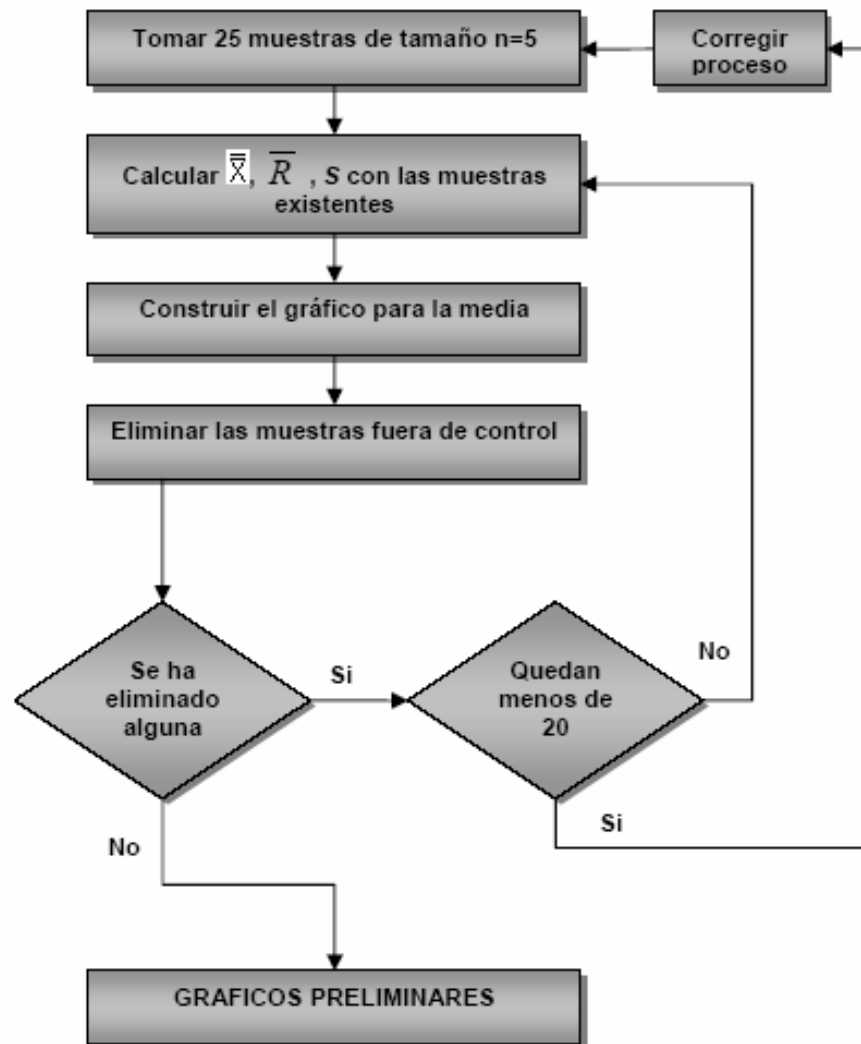


Fig. No 14.- Proceso de Construcción de graficas de control iniciales.

- 1) Elegir la característica que debe graficarse.
- 2) Elegir el tipo de gráfica de control.
- 3) Decidir la línea central que deben usarse y la base para calcular los límites. La línea central puede ser el promedio de los datos históricos o puede ser el promedio deseado.
- 4) Seleccionar el subgrupo racional. Cada punto en una gráfica de control representa un subgrupo que consiste en varias unidades de producto.

- 5) Proporcionar un sistema de recolección de datos si la gráfica de control ha de servir como una herramienta cotidiana en la planta.
- 6) Calcular los límites de control y proporcionar instrucciones específicas sobre la interpretación de los resultados y las acciones que debe tomar cada persona en producción.
- 7) Graficar los datos e interpretar los resultados

6.4.3.1.- Ventajas del uso de gráficos de control.-

Existen por lo menos 5 razones para el uso:

- 1) **Los gráficos de control son una técnica probada para mejorar la productividad.** Un exitoso programa de gráficos de control reducirá el rechazo y la reelaboración, que son los principales problemas en la productividad. Reduciendo el rechazo y la reelaboración, la productividad aumenta, los costos disminuyen y la capacidad de la producción aumenta.
- 2) **Los gráficos de control son eficaces para evitar defectos.** El gráfico de control ayuda a mantener el proceso bajo control, lo que es congruente con la filosofía de *hacerlo bien desde el principio*. Siempre es más costoso separar los artículos *buenos* de los *malos* después de su fabricación, que hacerlos correctamente desde el principio.
- 3) **Los gráficos de control evitan ajustes innecesarios al proceso.** Un gráfico de control puede distinguir entre el ruido de fondo y una variación anormal; ningún otro dispositivo, ni siquiera un operario humano, es tan eficiente. Esto evita los ajustes innecesarios, que son los que pueden provocar realmente un deterioro del funcionamiento del proceso.
- 4) **Los gráficos de control proporcionan información para el análisis.** A menudo, el patrón de los puntos en el gráfico de control contiene información diagnóstica para un operario o ingeniero con experiencia. Esta información permite implementar un cambio en el proceso que mejore su rendimiento.
- 5) **Los gráficos de control proporcionan información acerca de la capacidad del proceso.** El gráfico de control ofrece información sobre el valor de parámetros importante del proceso y de su estabilidad en el tiempo. Esto permite estimar la

capacidad del proceso. Dicha información es de gran utilidad para los diseñadores de productos y procesos.

6.4.3.2.- Desventajas del uso de gráficas de control.-

Se puede mencionar al menos tres de ellas:

- 1) No detecta variabilidades menores o bajas.
- 2) Aplicable en sigmas bajos (2-3) de calidad.
- 3) Es correctivo al inicio, pero con un manejo adecuado podríamos predecir la calidad del producto.

6.4.3.3.- Tipos de gráficas de control.-

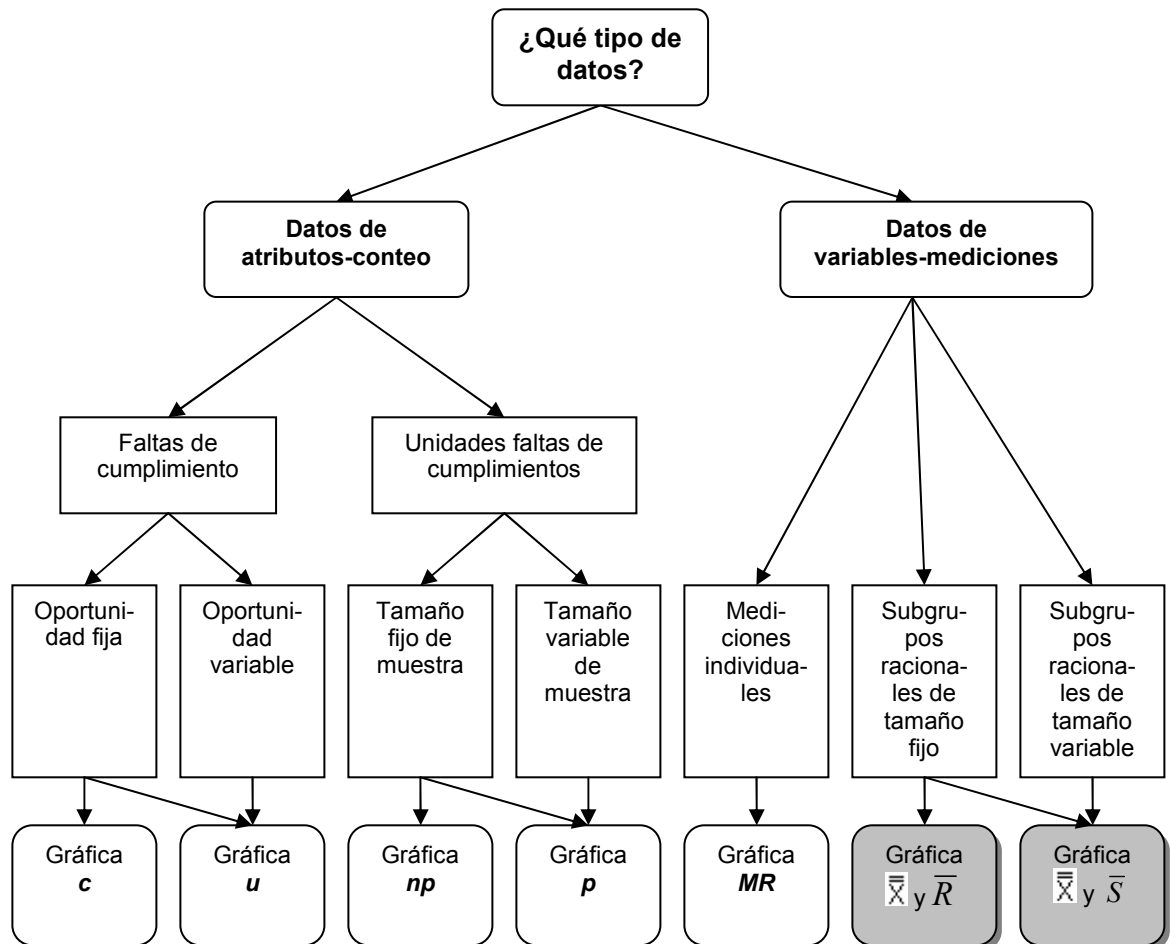


Fig. No. 15.- Clasificación de gráficas de control, por el tipo de datos. En el proceso de beneficio de minerales las variables a controlar son datos variables y se trabajará con las gráficas \bar{X} y \bar{R} ; \bar{X} y \bar{S} .

Los gráficos de control se diferencian de acuerdo al tipo de datos que se producen en las mediciones. (Ver fig. 15).

6.1.4.4.- Construcción de Gráficas $\bar{\bar{X}}$ y \bar{R}

Las cartas de control $\bar{\bar{X}}$ y \bar{R} se usan ampliamente para monitorear la media y la variabilidad. El control del promedio del proceso, o nivel de calidad medio, suele hacerse con la gráfica de control para medias, o gráfica $\bar{\bar{X}}$. La variabilidad de proceso puede monitorizarse con una gráfica de control para el rango, llamada gráfica R. Generalmente, se llevan gráficas $\bar{\bar{X}}$ y \bar{R} separadas para cada característica de la calidad de interés.

Las gráficas se encuentran entre las técnicas estadísticas de monitoreo y control de procesos en línea más importantes y útiles.

Los pasos para crear las gráficas se irán detallando paso a paso con un ejemplo de contenido de plomo en agua, y siendo el Excel un software comercial de amplio uso en nuestro medio, explicaremos en detalle cómo construir las gráficas de control $\bar{\bar{X}}$ y \bar{R} y S utilizando dicho software.

6.1.4.4.1.- Creando una gráfica \bar{R} en Excel

Toma de muestras

Periódicamente se toma una pequeña muestra (por ejemplo, de cinco unidades) del proceso, y se calculará el promedio (\bar{X}) y el rango (R) de cada una. Debe recolectarse un total de al menos 50 medias individuales (esto es, diez muestras de cinco cada una) antes de calcular los límites de control. Éstos se establecen a $\pm 3\sigma$ para los promedios y rangos muestrales. Los valores de R, $\bar{\bar{X}} - \bar{R}$ y $\bar{\bar{X}} + S$ se grafican por separado contra sus límites a $\pm 3\sigma$.

Por ejemplo:

Se ha obtenido una gráfica del contenido de plomo en partes por billón de 5 muestras de agua registradas diariamente por un periodo de 5 días, que se muestra a continuación:

Estos datos servirán para el desarrollo de las gráficas $\bar{\bar{X}}$ y \bar{R} . Éstos deberán ser introducidos en una hoja de Excel como se muestra en el cuadro (tabla no. 5).

Día	Muestras de agua				
	1	2	3	4	5
1	13	8	2	5	8
2	0	6	1	9	15
3	4	2	4	3	4
4	3	15	8	3	5
5	5	10	5	4	0
6	9	5	13	7	7
7	0	4	4	3	9
8	9	3	0	6	0
9	14	0	0	5	3
10	3	9	5	0	2
11	5	8	0	7	8
12	3	2	2	7	4
13	5	11	14	8	3
14	13	5	5	12	7
15	7	0	1	0	6
16	12	7	10	4	13
17	9	4	4	8	9
18	6	1	1	3	13
19	7	0	5	7	2
20	10	0	10	12	7
21	3	7	5	10	12
22	3	0	10	5	4
23	3	3	0	6	9
24	0	2	3	6	7
25	2	3	5	4	10
26	3	1	4	2	4
27	2	4	5	13	4
28	0	16	7	2	11
29	3	5	9	8	6
30	9	7	10	13	0

Tabla No. 5.- Ejemplo de datos para la construcción de gráficos de control.

Cálculo del rango R de las muestras

A continuación, deberán calcularse los rangos promedios de las muestras. El rango es la diferencia del valor mayor de la muestra menos el valor menor de la muestra, esto es, de manera muy abstracta, $R = M - m$, donde M es el mayor y m es el menor.

Aplicando este conocimiento a nuestro ejemplo, se calculan los valores de los rangos muestrales de la siguiente forma:

Día	Muestras de agua					Ri
	1	2	3	4	5	
1	13	8	2	5	8	11
2	0	6	1	9	15	15
3	4	2	4	3	4	2
4	3	15	8	3	5	12
5	5	10	5	4	0	10

M=13 y m=2: entonces $13 - 2 = 11$

M=15 y m=0: entonces $15 - 0 = 15$

M= 4 y m=2: entonces $4 - 2 = 2$

M=15 y m=3: entonces $15 - 3 = 12$

M=10 y m=0: entonces $10 - 0 = 10$

Tabla No. 6.- Cálculo de los rangos para $n = 5$.

Día	Muestras de agua					Ri
	1	2	3	4	5	
1	13	8	2	5	8	11
2	0	6	1	9	15	15
3	4	2	4	3	4	2
4	3	15	8	3	5	12
5	5	10	5	4	0	10
6	9	5	13	7	7	8
7	0	4	4	3	9	9
8	9	3	0	6	0	9
9	14	0	0	5	3	14
10	3	9	5	0	2	9
11	5	8	0	7	8	8
12	3	2	2	7	4	5
13	5	11	14	8	3	11
14	13	5	5	12	7	8
15	7	0	1	0	6	7
16	12	7	10	4	13	9
17	9	4	4	8	9	5
18	6	1	1	3	13	12
19	7	0	5	7	2	7
20	10	0	10	12	7	12
21	3	7	5	10	12	9
22	3	0	10	5	4	10
23	3	3	0	6	9	9
24	0	2	3	6	7	7
25	2	3	5	4	10	8
26	3	1	4	2	4	3
27	2	4	5	13	4	11
28	0	16	7	2	11	16
29	3	5	9	8	6	6
30	9	7	10	13	0	13
R						9.167

Tabla No. 7.- Cálculo de \bar{R}

Enseguida, se calculará el valor de R, que es el promedio de los rangos muestrales. Esto se obtiene sumando las Ri obtenidas en todas las muestras y dividiéndolo entre el número de observaciones realizadas.

En el ejemplo se tiene que n = 30 porque cada uno de los 30 días se hizo 1 muestra; la suma de los rangos deberá dividirse, entonces, entre 30. Esto puede calcularse con la función de Excel PROMEDIO seleccionando la columna de datos correspondiente a Ri. Se recomienda crear un apartado en el diseño de la hoja de Excel que se esté utilizando donde se guarden estos valores, ya que se necesitarán para cálculos posteriores.

Y así sucesivamente con todos los valores de la gráfica.

Cálculo de la R promedio (Línea Central)(Tabla. No. 7)

Cálculo de Límites Superior e Inferior de los Rangos Muestrales.-

Como ya se ha explicado, los límites superior e inferior nos ayudan a deducir si nuestro gráfico se encuentra dentro o fuera de control. Por esto es necesario ubicar su lugar en el histograma (que se hará posteriormente) con ayuda de las siguientes fórmulas abreviadas:

$$\text{Limite de control superior} = D_4 \bar{R}$$

$$\text{Limite de Control Inferior} = D_3 \bar{R}$$

Donde D₃ y D₄ son constantes aplicadas en nuestro ejemplo, y que se encuentran en la siguiente tabla:

Número de observaciones en una muestra	A ₂	D ₃	D ₄	Factor para la estimación de R: d ₂ =R/s
2	1,880	0	3,268	1,128
3	1,023	0	2,574	1,693
4	0,729	0	2,282	2,059
5	0,577	0	2,114	2,326
6	0,483	0	2,004	2,534
7	0,419	0,076	1,924	2,704
8	0,373	0,136	1,864	2,847
9	0,337	0,184	1,816	2,970
10	0,308	0,223	1,777	3,078
11	0,285	0,256	1,744	3,173
12	0,266	0,284	1,717	3,258
13	0,249	0,308	1,692	3,336
14	0,235	0,329	1,671	3,407
15	0,223	0,348	1,652	3,472

Tabla No. 8.- Tabla de constantes D₃, D₄, A₂, para diferentes n.

La selección de las constantes D dependerán del número de observaciones en nuestra muestra; como nuestro ejemplo consta de 5 observaciones, $D_3=0$ y $D_4=2,114$.

Así, se sustituye el valor seleccionado en la fórmula y se obtiene que

$$\text{Limite de control superior} = D_4 \bar{R}$$

$$\text{Limite de control superior} = (2,114) (9,167) = \underline{19,38}$$

$$\text{Limite de Control Inferior} = D_3 \bar{R}$$

$$\text{Limite de control superior} = (0)(9,167) = \underline{0}$$

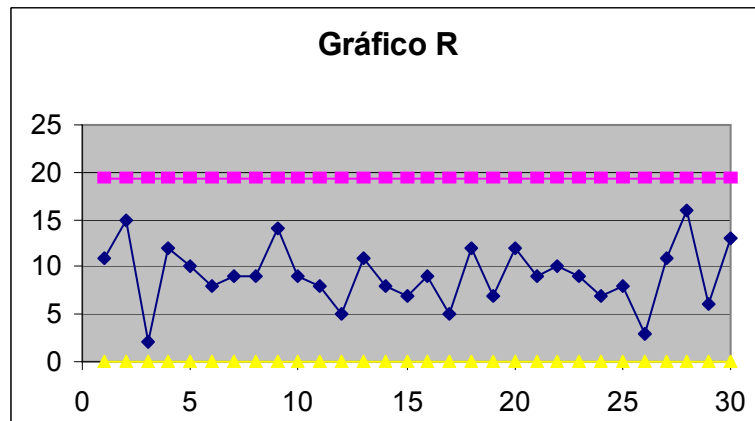


Fig. No 16.- Grafico de control de R para el ejemplo de mediciones de plomo.

6.4.4.2.- Creando una gráfica \bar{X} , \bar{R} y \bar{S} en Excel

En base a la primera tabla de datos, se realizará ahora un gráfico \bar{X} , que es muy parecida a la anterior; la diferencia radica en que en lugar de tomar R como valores de Y, se toma el valor del promedio de X.

Cálculo de los promedios \bar{X} de las muestras (Línea Central)

En la tabla de datos se agrega una columna y se realiza el cálculo de los promedios, que es la suma de los elementos de la primera muestra m entre el número de elementos, esto es,

$$\bar{X} = (m_1 + m_2 + \dots + m_n) / n. \text{ Media aritmética.}$$

En Excel puede utilizarse la fórmula (=PROMEDIO($m_1:m_n$)), adecuado a cada ejercicio en particular.

Este promedio se aplica a cada tamaño de muestra $n=5$, obteniéndose 30 promedios X_i .

Tabla No. 9.

De igual manera el Excel nos permite calcular la desviación estándar (=DESVEST(m1:mn)).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n}} ; \text{Desviación estándar}$$

Aplicándolo al ejemplo, se tiene que el valor de n=5 porque son 5 muestras en total, obteniendo los valores de \bar{X} :

	Muestras de agua						σ
Día	1	2	3	4	5	X_i	
1	13	8	2	5	8	7,2	4,09
2	0	6	1	9	15	6,2	6,14
3	4	2	4	3	4	3,4	0,89
4	3	15	8	3	5	6,8	5,02
5	5	10	5	4	0	4,8	3,56
6	9	5	13	7	7	8,2	3,03
						6,1	3,79

Tabla No.- 9.- Cálculo de \bar{X} i y Si= δ .

Cálculo del promedio de promedios ($\bar{\bar{X}}$)

Como su nombre lo indica, el promedio de promedios $\bar{\bar{X}}$ se calcula sacando el promedio de los resultados obtenidos de \bar{X} .

$$\bar{\bar{X}} = (\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3 + \bar{X}_4 + \dots + \bar{X}_n) / n$$

El valor de $\bar{\bar{X}}$ será posteriormente utilizado en las fórmulas de cálculo de los límites superior e inferior de la gráfica, así que es importante conservar en la mente dicho valor.

Por esto se recomienda que una vez calculado, se enmarque o copie este valor en la misma hoja de Excel pero en un espacio especial para facilitar la resolución de dichas fórmulas.

Día	Muestras de agua					Xi	σ
	1	2	3	4	5		
1	13	8	2	5	8	7,2	4,09
2	0	6	1	9	15	6,2	6,14
3	4	2	4	3	4	3,4	0,89
4	3	15	8	3	5	6,8	5,02
5	5	10	5	4	0	4,8	3,56
6	9	5	13	7	7	8,2	3,03
7	0	4	4	3	9	4,0	3,24
8	9	3	0	6	0	3,6	3,91
9	14	0	0	5	3	4,4	5,77
10	3	9	5	0	2	3,8	3,42
11	5	8	0	7	8	5,6	3,36
12	3	2	2	7	4	3,6	2,07
13	5	11	14	8	3	8,2	4,44
14	13	5	5	12	7	8,4	3,85
15	7	0	1	0	6	2,8	3,42
16	12	7	10	4	13	9,2	3,70
17	9	4	4	8	9	6,8	2,59
18	6	1	1	3	13	4,8	5,02
19	7	0	5	7	2	4,2	3,11
20	10	0	10	12	7	7,8	4,71
21	3	7	5	10	12	7,4	3,65
22	3	0	10	5	4	4,4	3,65
23	3	3	0	6	9	4,2	3,42
24	0	2	3	6	7	3,6	2,88
25	2	3	5	4	10	4,8	3,11
26	3	1	4	2	4	2,8	1,30
27	2	4	5	13	4	5,6	4,28
28	0	16	7	2	11	7,2	6,53
29	3	5	9	8	6	6,2	2,39
30	9	7	10	13	0	7,8	4,87
						$\bar{\bar{X}}$	
						5,59	3,71

Tabla No 10.- Calculo de $\bar{\bar{X}}$ y $\bar{S} = \bar{\sigma}$ promedios.

Cálculo de Límites Superior e Inferior de X para gráficos $\bar{\bar{X}}$ y \bar{R}

Los límites se calculan con las siguientes fórmulas abreviadas:

$$\text{Límite de control superior} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R}$$

$$\text{Límite de control inferior} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R}$$

Donde:

$\bar{\bar{X}}$ = Gran promedio = promedio de los promedios muestrales

\bar{R} = Promedio de los rangos muestrales

A_2 = Constante de tablas (anexo 2 ó tabla No. 8)

El valor de la constante puede consultarse en la tabla No 8, que es igual a 0,577 para nuestro ejemplo de 5 observaciones. Como los valores de $\bar{\bar{X}}$ y \bar{R} han sido calculados a lo largo de este ejemplo, sólo se sustituyen en las fórmulas de la siguiente forma:

$$\text{Límite de Control superior} = \bar{\bar{X}} + A_2\bar{R}$$

$$\text{Límite de Control superior} = (5,59) + (0,577)*(9,17) = 10,88$$

$$\text{Límite de control inferior} = \bar{\bar{X}} - A_2\bar{R}$$

$$\text{Límite de control inferior} = (5,59) - (0,577)*(9,17) = 0,30$$

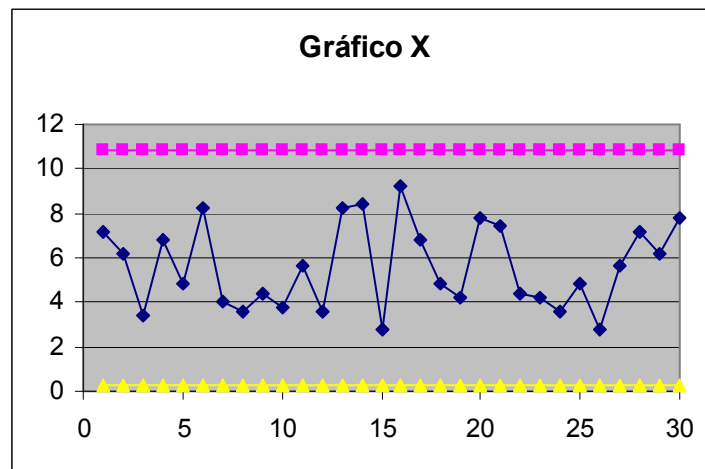


Fig. No. 17.- Grafico $\bar{\bar{X}}$ y \bar{R} .

6.4.4.3.-Gráficos $\bar{\bar{X}}$ y \bar{S} .

Este grafico se basa en la media de medias y la media de las desviaciones estándares de las mediciones de $n=5$.

Determinación de $\bar{\bar{X}}$ y \bar{S} .

Estos valores ya fueron calculados anteriormente y se obtuvo:

$$\bar{\bar{X}} = 5,59 ; S = 3,71$$

Cálculos de límites superior e inferior de $\bar{\bar{X}}$ y \bar{S}

Límite de control superior = $\bar{\bar{X}} + A2 * S$

Límite de control inferior = $\bar{\bar{X}} - A2 * S$

Donde:

$\bar{\bar{X}}$ = Gran promedio = promedio de los promedios muestrales

$\bar{S} = \bar{\sigma}$ = Promedio de las desviaciones estándares de muestras con n= 5.

Límite de control superior= $5,59 + 0,577*3,71 = 7,73$

Límite de control inferior = $5,59 - 0,577*3,71 = 3,45$

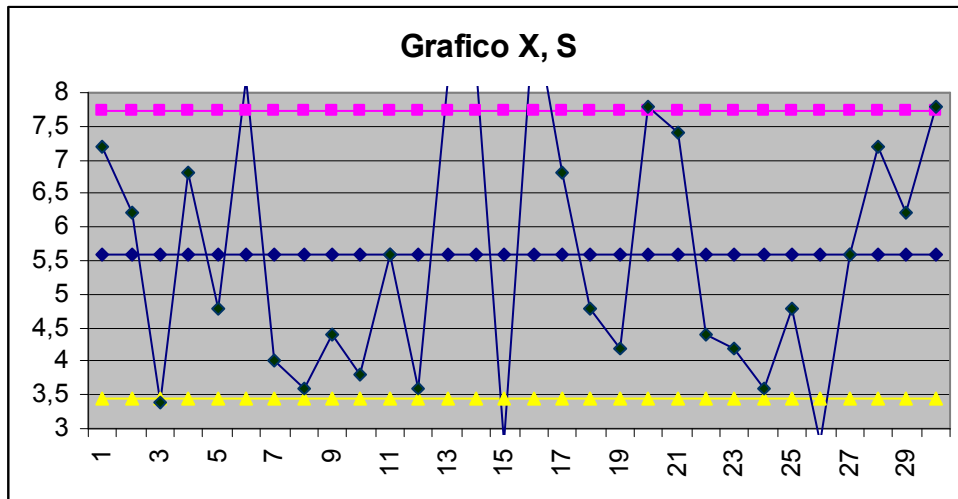
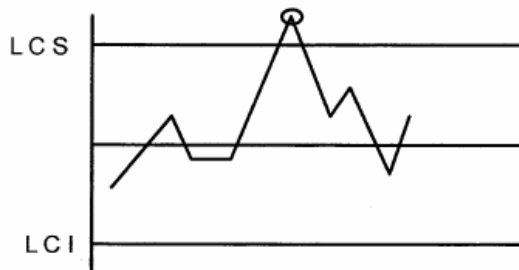


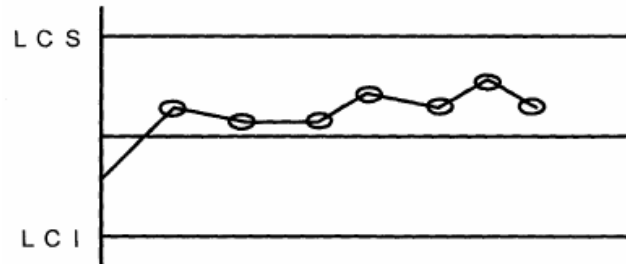
Fig. No.18.- Las gráficas $\bar{\bar{X}}$, \bar{S} son aplicables para $n > 10$ y poblaciones muestrales *normales*, por lo que se ve en la gráfica que varios valores están fuera de control. Además de considerar $N > 10$, debemos construir un histograma y ver si el modelo se ajusta a una distribución Normal.

6.4.5.- Interpretación de Anomalías de las cartas de control: causas y efectos.-

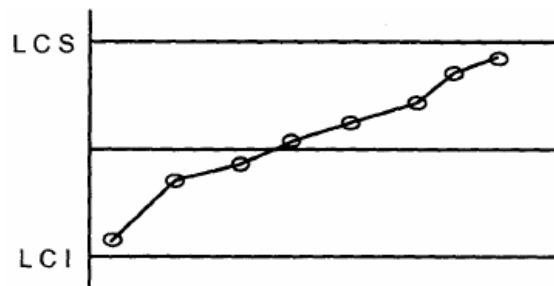
Un punto fuera de los límites de control. Principal señal de falta de control. Se rechaza la hipótesis nula de estabilidad del proceso: se ha modificado el parámetro poblacional.



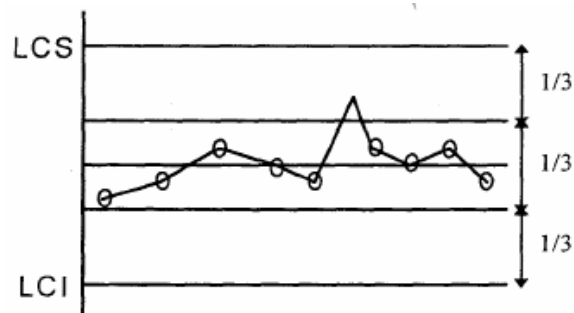
Una serie de siete o más puntos a un lado de la línea central. Señal de aumento o disminución del parámetro poblacional.



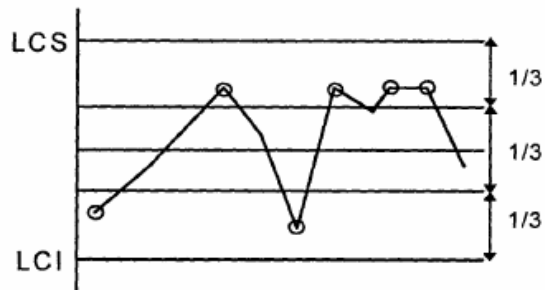
Tendencia creciente o decreciente. Algo genera una inestabilidad continua en el tiempo como por ejemplo, una máquina o herramienta sufre desgaste, el cansancio de operarios, una solución se diluye, etc.



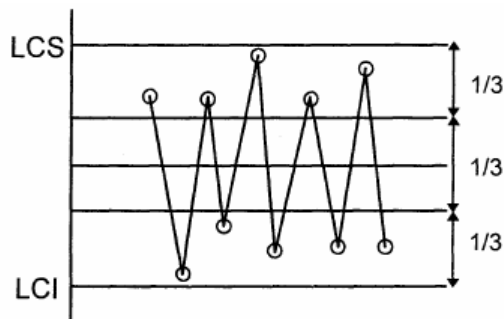
Acumulación de puntos en el tercio central (más de dos tercios de puntos a menos de 1 desviación típica de la línea central). Probablemente se han mantenido los límites durante demasiado tiempo y ya no se refleja la disminución de la dispersión (variabilidad). O bien el instrumento de la medida no refleja correctamente valores extremos.



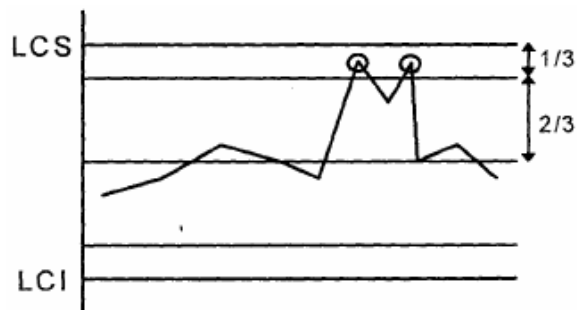
Acumulación de puntos cerca de los Límites de control (Más de un tercio de los puntos a más de 1 desviación típica de la línea central). Suele ser originado por una mezcla de producciones de dos o más máquinas



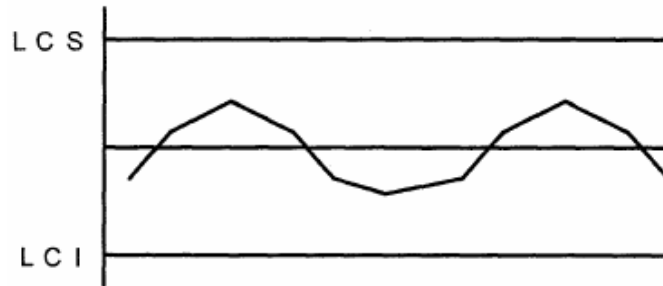
Dientes de sierra. Es un caso exagerado de la señal anterior, pero se debe frecuentemente a un sobrecontrol, demasiadas regulaciones innecesarias de la máquina.



Dos puntos de tres consecutivos en la zona de atención (a más de dos desviaciones típicas). Es una señal de alarma ya que si el proceso estuviera bajo control en esta zona se situarían aproximadamente un 5% de puntos y la probabilidad de que se sitúen dos de tres consecutivos es de 2,3 por mil.



Ciclos. Esta señal de alarma suele producirse por causas de variación cíclicas como turnos de trabajo, cambios de temperatura o humedad ambientes, on-off de un automatismo, etc.



6.4.6.- Capacidad de proceso ó de un indicador de calidad.

Una vez que el indicador de calidad se encuentra bajo control, es importantísimo determinar si satisface las especificaciones determinadas por los clientes, por contratos y otros mecanismos. Usualmente, un indicador de calidad tiene especificaciones superior e inferior, denominadas Límite Superior de Especificación (LSE) y Límite Inferior de Especificación (LIE). Por ejemplo, si se requiere producir concentrados de zinc con ley media de 50%, sus especificaciones podrían ser 48% y 52%.

Una unidad de producción, bien o servicio, que tenga su indicador de calidad fuera de las especificaciones, es rechazada como defectuosa (provocándose costos innecesarios y altos). Naturalmente interesa que la proporción de unidades rechazadas sea mínima o eventualmente cero. Para ello, la variabilidad del proceso debe ser disminuida de modo que su “distribución” esté comprendida dentro de los límites de especificación determinados.

El grado de cumplimiento de un indicador de calidad con sus especificaciones, puede ser medido mediante dos índices

6.4.6.1.- Índice de Capacidad Potencial (Cp):

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

En una distribución cercana a la Normal, el rango 'práctico' de las observaciones está entre $(\mu - 3\sigma)$ y $(\mu + 3\sigma)$, es decir, en un rango de 6σ . En consecuencia, el índice de capacidad potencial, C_p , compara el 'rango permitido por las especificaciones' con el 'rango práctico' alcanzado.

Decimos que si

$$C_p \geq 1.0 \quad (\text{rango permitido mayor o igual al alcanzado})$$

Entonces el indicador de calidad es capaz. Como σ es desconocida, puede ser estimada a partir de los gráficos $\bar{X} - R$ mediante:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

donde d_2 es una constante tabulada.

Además:
$$d_2 = 3/(A_2 \cdot \sqrt{n})$$

Se determina el Coeficiente de Capacidad Potencial estimado como

$$\hat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}}$$

El centro entre las especificaciones, es decir, $\mu_0 = \frac{LIE + LSE}{2}$, representa el valor que

el indicador de calidad debería de alcanzar. Cuando \bar{X} no es igual al valor objetivo μ_0 , se dice que el proceso se encuentra no centrado o descentrado. En ese caso, no es suficiente determinar la capacidad potencial, pues C_p no toma en cuenta el descentramiento. En esta situación, puede haber un número importante de unidades fuera de especificaciones debido al descentramiento, y no tanto debido a variabilidad excesiva.

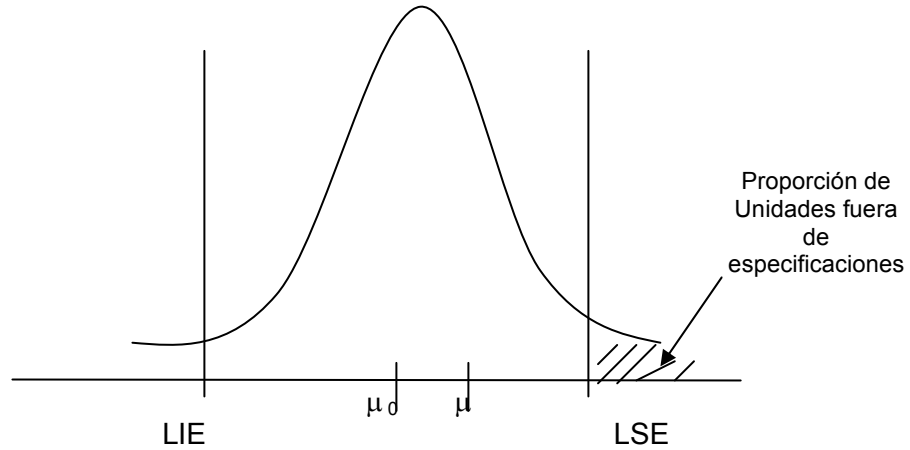


Fig. No. 19.- Grafico de capacidad de proceso, mostrando proporciones fuera de especificaciones y centrado.

ICP	Decisión
1,33<ICP<2,22	Más que adecuado, incluso puede exigirse más en términos de su capacidad. Posee capacidad de diseño.
1<ICP<1,33	Adecuado para lo que fue diseñado. Requiere control estrecho si se acerca al valor de 1.
0,67<ICP<1	No es adecuado para cumplir con el diseño inicial. Requiere monitoreo constante.
ICP<0,67	No es adecuado para cumplir con el diseño inicial.

Tabla No. 11.- Valores de los índices de capacidad de proceso (ICP)y las decisiones recomendadas que se deben tomar en cada una de ellas.

6.4.6.2.- Capacidad Efectiva de proceso (Cpk).

Para medir la capacidad en situaciones de descentramiento, se puede utilizar el Índice de Capacidad Efectiva, Cpk:

$$Cp_k = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right\}$$

Su valor estimado queda dado por

$$\hat{C}pk = \text{Min} \left\{ \frac{LSE - \bar{X}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\hat{\sigma}} \right\}$$

Naturalmente, también se requiere que $\hat{C}pk$ sea mayor o igual a 1,0 para que el proceso sea capaz. Tanto un valor de Cp como de Cpk puede ser transformado en un valor de PPM (partes defectuosas por millón de oportunidades). Por ejemplo un Cp de 1,0,

suponiendo un proceso centrado, equivale a un PPM de 2.700 (2.700 defectos por millón de oportunidades). En una distribución Normal, el 99,73% de las observaciones se encuentra en el intervalo $[\mu-3\sigma, \mu+3\sigma]$. En consecuencia, el 0.27% de las observaciones está fuera del intervalo. Ello corresponde a 2.700 de cada 1.000.000. Análogamente puede determinarse el PPM equivalente para cada valor de C_p y también para cada valor de C_{pk} .

Se puede observar, que en un proceso centrado, como $C_p = \frac{LSE - LIE}{6} = \frac{\Delta E}{6}$, se tiene $\Delta E = C_p \cdot 6\sigma = (6 \cdot C_p) \sigma$

Es decir, entre los límites de especificaciones caben $(6C_p)$ veces σ . Como está centrado, a cada lado de la media caben $(3C_p)$ veces σ . Como es esperable, en el caso de un C_p igual a 1.0, se tiene 3σ a cada lado de la media, dentro de las especificaciones. C_p aumenta cuando σ decrece, aumentando el número de σ a cada lado de la media dentro de las especificaciones, y reduciendo el valor de PPM.

Así, C_p , el n° de σ a cada lado de la media y dentro de especificaciones, y el valor de PPM son todas medidas equivalentes del nivel de calidad de un proceso. Naturalmente, PPM es más tangible y de más fácil interpretación. Adicionalmente, puede ser traducido en costos producidos por las unidades rechazadas y en pérdidas de oportunidades de ganancia debido a mala calidad.

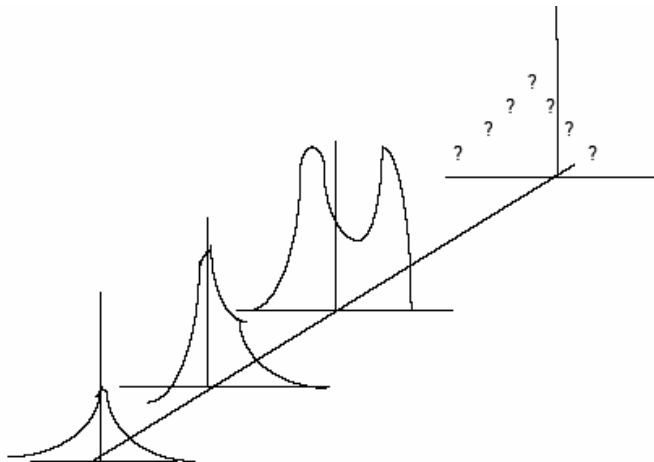


Fig. No. 20.- Si las variaciones presentes no son iguales, se dice que se tiene un proceso fuera de control y no estable e impredecibles en el tiempo.

En la práctica un proceso no centrado, no capaz es impredecible y errático en su comportamiento (Fig. 20).

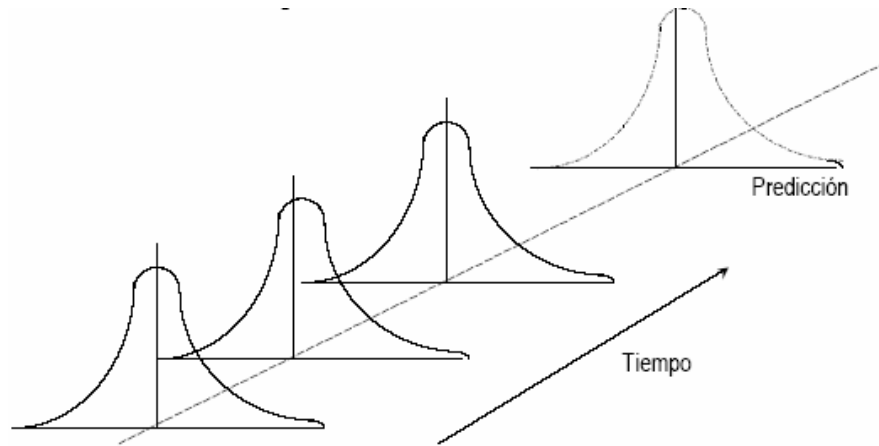


Fig. No. 21.- Si las variaciones presentes son iguales, se dice que se tiene un proceso 'estable'. La distribución será 'predecible' en el tiempo.

Mientras un proceso centrado y capaz es fácil de predecir; lo que significa que podemos producir productos con variaciones dentro los límites de especificación solicitados por el cliente (fig. 21).

7.- Propuesta, recomendaciones y conclusiones.

7.1.- Propuesta.

La propuesta de implementación del control estadístico de procesos como una vía para mejorar la:

- Calidad del producto, (incremento de ley del concentrado). Leyes uniformes de concentrados de minerales; evita errores de muestreo en la venta.
- Recuperación metalúrgica, (recuperar mineral que pasa a las colas o deshechos). Aumenta el tonelaje de concentrados.
- Minimizar las impurezas del concentrado. Estas impurezas (antimonio, arsénico, hierro, sílice y otros) son penalizadas en la venta de concentrados.
- Uso adecuado de reactivos. Reducción de costos de operación.

Permitirán a las compañías mineras mejores precios para sus concentrados, lo que significa mayores ingresos. Al mismo tiempo, estarán preparadas para operar con precios de metales más bajos que otras compañías que tienen sus procesos fuera de control; convirtiéndose en ventaja competitiva.

La implementación debe considerar:

- **Muestreadores de pulpas adecuados**, que tomen muestras representativas de acuerdo a la teoría de muestreo de Pierre Gy. El muestreo de minerales particulados tiene muchos problemas que necesitan ser considerados.
- **Los ensayos de minerales o mediciones de contenidos metálicos en las muestras deben ser válidos y confiables**, trazables a patrones nacionales o internacionales.
- **Control estadístico de proceso**, utilizando principalmente los gráficos de control X, R y S, deben trabajar en forma escalonada ascendente desde controlar el proceso, medir la capacidad y mejorar el proceso fig. No. 23. La fig. No 22, muestra un diagrama de flujo de la implementación del CPE.

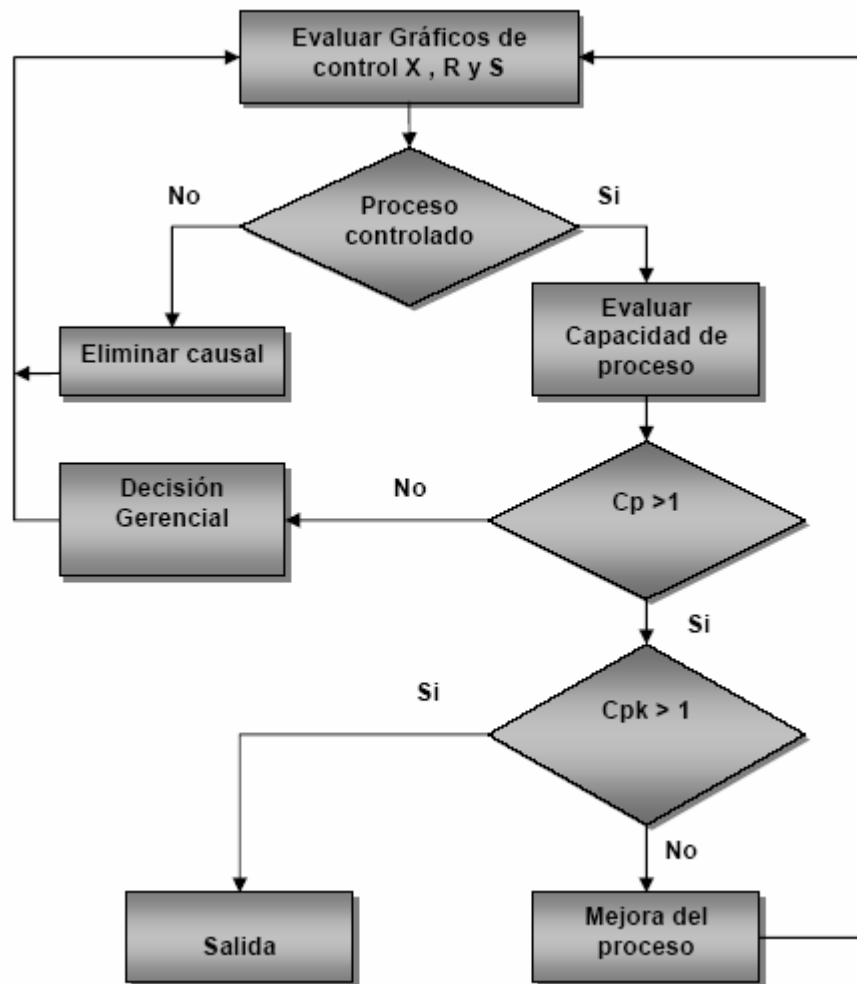


Fig. No. 22.- Diagrama de flujo de la implementación del Control Estadístico de Proceso.

7.2.- Recomendaciones.

Las recomendaciones o sugerencias para ingresar en el ciclo de Deming y en la mejora continua deben ser:

- Uso de las siete herramientas básicas de la calidad, acompañadas de las siete herramientas administrativas. ***Todavía es correctiva, pero permite analizar, identificar y mejorar el proceso.*** Fig. 23 y 24.
- Sistemas de Gestión de calidad e.g. ISO 9001. Esto con el objeto de documentar, sistematizar los procedimientos, preparación y capacitación de

personal en calidad e introducir a la compañía en el significado y beneficios de implantación de sistemas de gestión de calidad.

- Implementación de la filosofía 6 sigma, se caracteriza por ser **preventiva y fuertemente controlado por indicadores de calidad.**

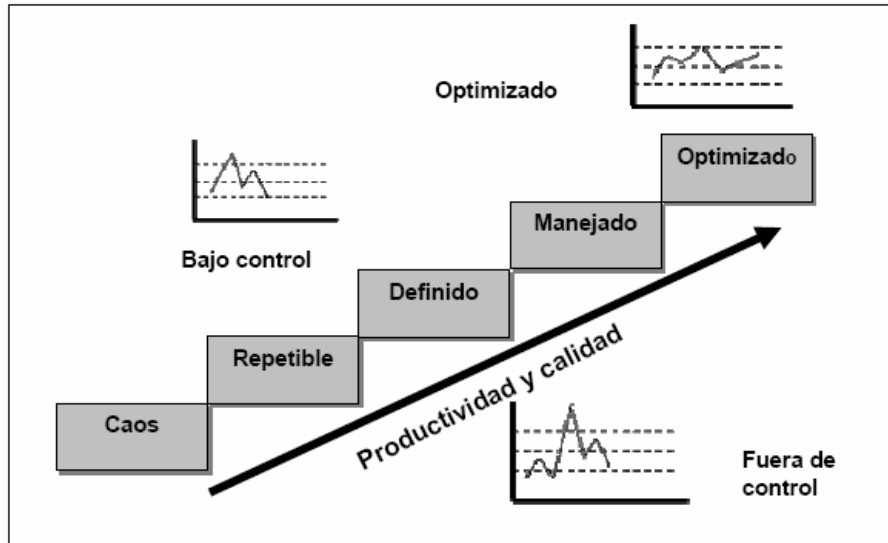


Fig. No. 23.- Mejora aplicando las siete herramientas de la calidad de un proceso.

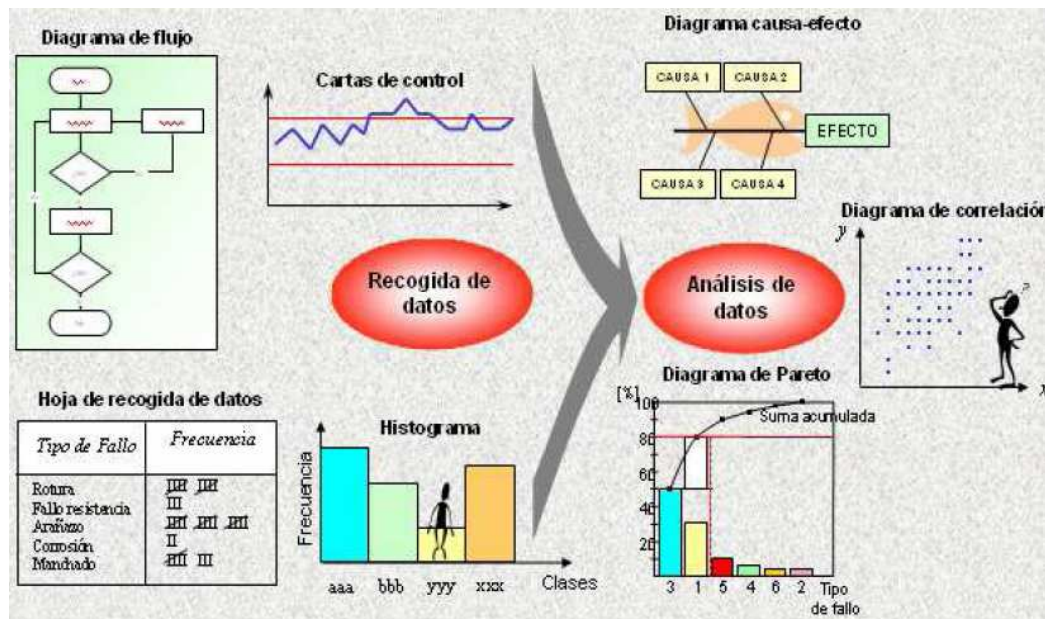


Fig. No 24.- Aplicación de las 7 herramientas de la calidad en un proceso. El CEP si bien controla el proceso no indica en forma clara donde están las variaciones atribuibles o causas asignables

9.- Bibliografía.

1. Alfaro, M. Antonio. "Introducción al muestreo minero". (2002). (online). Internet. 20 Julio 2006.
2. Besterfield H. Dale, Control de calidad, México, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A., 1994. 508 p.
3. Especialización superior en estrategias de calidad, Módulo 6: Gestión Metrológica en las empresas. Juan Carlos Castillo, 2008.
4. Especialización Superior en Estrategias de la calidad, Modulo VII: Herramientas para procesos de mejora. Mario espinoza,. Febrero 2008.
5. Espinoza, Mario (mesgar@hotmail.com). (2008, Febrero, 27). Gráficas de Control. C-electrónico a esecm3@gmail.com.
6. Hugo Guerrero, Curso "Control interno de la calidad de los resultados en laboratorios de ensayos" [Diapositiva]. La Paz-Bolivia, IBMETRO, 2005. 25, diapositivas, col.
7. Hugo Guerrero. Ref: Lecturas curso control de calidad, Fluorescencia de rayos x. Disponible en: http://www.uned.es/cristamine/mineral/minbas_mrc.htm.
8. Nocerino, M. Jhon, Gerlach, W. Robert. "Guidance for obtaining representative laboratory analytical subsample from particulate samples". (2003). (online). Internet. Agosto 2006.
9. Pittard, F. Francis, Pierre Gy's Sampling Theory and Sampling Practice, CRC press.USA. 1993. 488 p.
10. Sampling theory, sampling practices and their economic impact. Office of special programs & continuing education. Colorado School of Mines. October 17-20, 2006. Golden, Colorado USA.

Anexo 1.- Conceptos básicos de Estadística.

Desde el punto de vista histórico, la estadística asentó su dominio en el control de la calidad de productos en serie (de producción masiva). La necesidad de transmitir estos métodos a series pequeñas y procesos administrativos se debe al hecho que el análisis de datos permite visualizar mejor el potencial de mejora¹.

Durante mucho tiempo se evaluó la calidad de un producto en la inspección final. Luego se impuso el concepto de que es más rentable hacer un control/regulación durante el proceso, en el sentido del Control Estadístico de Procesos. Tendencias más modernas en la gestión de la calidad apuntan fuertemente a las áreas de diseño del producto y de mejora de los procesos, por ejemplo con la ayuda del diseño de experimentos. Además, la tendencia es desarrollar procesos que sean insensibles a las magnitudes perturbadoras.

La estadística es un soporte de las propiedades del mensurando, en especial de la representatividad (reglas de toma de muestra).

La validez de un experimento es a menudo juzgada por la confianza que se atribuye a los resultados numéricos, la cual depende del análisis de los errores de medición.

Los métodos estadísticos son necesarios para poder:

- Describir.
- Representar.
- Compactar.
- Analizar.
- Interpolar.

En forma adecuada los resultados de las muestras están sometidas a dispersiones.

Las dispersiones sufridas por las distintas características se deben a una infinidad de influencias aleatorias. Para su análisis, ha demostrado ser muy útil la clasificación de las influencias en las llamadas "5M".

¹ Métodos estadísticos para la toma de decisiones.

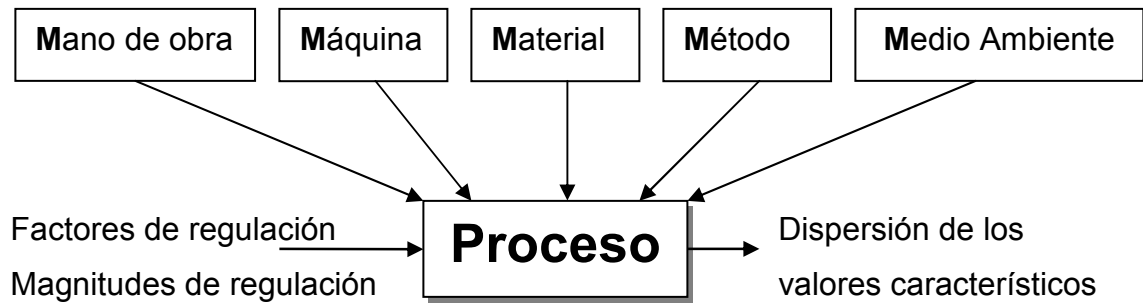


Fig. 1.1.- Efecto de las cinco áreas de influencia sobre un proceso que generan variabilidad.

Medidas de tendencia Central.-

Indican donde está el centro de un grupo de datos de una serie de mediciones.

Media Aritmética.-

Si se realiza una serie de mediciones de las propiedades del elemento a mensurarse, obteniéndose los resultados $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ la media aritmética se denota \bar{X} , y se calcula dividiendo la suma de observaciones por número de las mismas:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

n : Número de mediciones

\bar{X} : Promedio de mediciones

X_i : Valor de la medición i

Moda.-

El valor o valores observados con mayor frecuencia.

Mediana.-

El valor central de una serie de datos ordenados de menor a mayor (o viceversa).

Medidas de dispersión.-

Indican que tan parecidos o diferentes son los datos entre sí.

Varianza y Desviación Estándar.

Se evalúan a partir de los resultados de una serie de mediciones repetidas (tres como mínimo) en una muestra y se definen como:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_1^n (Xi - \bar{X})^2}{n}$$

VARIANZA .- Promedio de las desviaciones al cuadrado.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_1^n (Xi - \bar{X})^2}{n}}$$

DESVIACIÓN ESTANDÁR.- Raíz de la varianza

Estas formulas son para $n \leq 30$

Rango.-

Es la distancia entre el valor mayor y el menor, en una serie de datos:

$$R = VM - Vm$$

Donde:

VM = Valor mayor;

Vm = Valor menor.

Anexo 2.- Tabla de constantes.

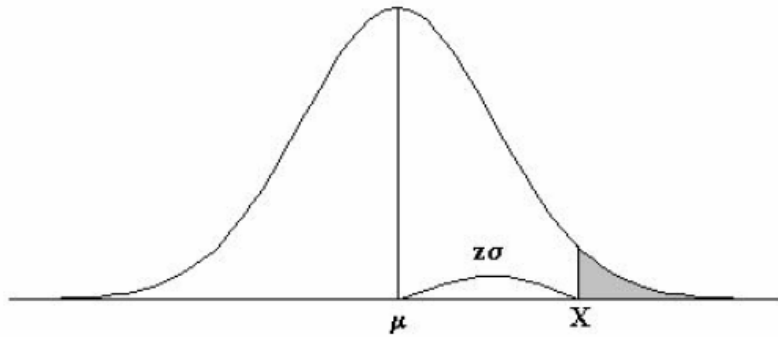
2.1.- Tabla de constantes para $\bar{\bar{x}}$ y R

Número de observaciones en una muestra	A ₂	D ₃	D ₄	Factor para la estimación de R: d ₂ =R/s
2	1,880	0	3,268	1,128
3	1,023	0	2,574	1,693
4	0,729	0	2,282	2,059
5	0,577	0	2,114	2,326
6	0,483	0	2,004	2,534
7	0,419	0,076	1,924	2,704
8	0,373	0,136	1,864	2,847
9	0,337	0,184	1,816	2,97
10	0,308	0,223	1,777	3,078
11	0,285	0,256	1,744	3,173
12	0,266	0,284	1,717	3,258
13	0,249	0,308	1,692	3,336
14	0,235	0,329	1,671	3,407
15	0,223	0,348	1,652	3,472

Número de unidades de la muestra n	Constantes		
	A ₃	B ₃	B ₄
2	2,66	0	3,27
3	1,95	0	2,57
4	1,63	0	2,27
5	1,43	0	2,09
6	1,29	0,03	1,97
7	1,18	0,12	1,88
8	1,10	0,19	1,82
9	1,03	0,24	1,76
10	0,98	0,28	1,72
11	0,93	0,32	1,68
12	0,89	0,35	1,65
13	0,85	0,38	1,62
14	0,82	0,41	1,59
15	0,79	0,43	1,57
16	0,76	0,45	1,55
17	0,74	0,47	1,53
18	0,72	0,48	1,52
19	0,70	0,50	1,50
20	0,68	0,51	1,49

Anexo 3.- Distribución Normal

Áreas bajo la curva normal



Ejemplo:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

$$P [Z > 1] = 0.1587$$

$$P [Z > 1.96] = 0.0250$$

Desv. normal x	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3228	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0119	0.0116	0.0113	0.0110
2.3	0.0107	0.0104	0.0102	0.0099	0.0096	0.0094	0.0091	0.0089	0.0087	0.0084
2.4	0.0082	0.0080	0.0078	0.0075	0.0073	0.0071	0.0069	0.0068	0.0066	0.0064
2.5	0.0062	0.0060	0.0059	0.0057	0.0055	0.0054	0.0052	0.0051	0.0049	0.0048
2.6	0.0047	0.0045	0.0044	0.0043	0.0041	0.0040	0.0039	0.0038	0.0037	0.0036
2.7	0.0035	0.0034	0.0033	0.0032	0.0031	0.0030	0.0029	0.0028	0.0027	0.0026
2.8	0.0026	0.0025	0.0024	0.0023	0.0023	0.0022	0.0021	0.0021	0.0020	0.0019
2.9	0.0019	0.0018	0.0018	0.0017	0.0016	0.0016	0.0015	0.0015	0.0014	0.0014
3.0	0.0013	0.0013	0.0013	0.0012	0.0012	0.0011	0.0011	0.0011	0.0010	0.0010