



DISEÑO DE UNA METODOLOGIA EFICIENTE Y ECONOMICA PARA EL MONITOREO AMBIENTAL EN AGUA,SUELO Y RESIDUOS SOLIDOS

Ing. Quim.,MSc. Gualberto Trelles ⁽¹⁾

(1)Laboratorio Ambiental ECOTECH.

Calle:Republica 1575 bis
Tel: 598 (2) 403 2130

Ciudad:Montevideo
Fax: 598 (2) 400 25 50

Uruguay CP
e-mail: lilos@adinet.com.uy

RESUMEN

Para el caso de diseño de monitoreos ambientales,se formula un modelo de gestión del mismo que contempla las perdidas económicas ocasionadas por tomar decisiones equivocadas y los costos asociados a una caracterización más exhaustiva que haga mínima la probabilidad de cometer estos errores

INTRODUCCIÓN

El monitoreo ambiental puede visualizarse como un proceso de adquisición de información a partir del ambiente con el objetivo de tomar una decisión,establecer un modelo o evaluar el estado de un sistema. .La definición del objetivo de la adquisición de la información,el número de muestras y su localización espacial-temporal dentro de los límites del proyecto, las metodologías de muestreo,tratamiento de la muestra y análisis y los requisitos de calidad de los datos condicionan la eficacia del monitoreo,es decir el cumplimiento de sus objetivos.

En cualquier escenario,el condicionamiento económico implica recursos limitados, a partir de los cuales es necesario obtener una información confiable y lleva al balance entre el costo de la investigación y el costo por falsos positivos o negativos en las decisiones.

Lo anterior implica considerar el criterio de adecuación al uso de los protocolos de muestreo-análisis definidos y la utilización de criterios económico-financieros junto con los técnicos para la selección de alternativas.

No se han relevado en Uruguay al día de hoy desarrollo de metodologías de monitoreo ambiental que integren la teoría estadística de decisiones,el análisis de riesgo,la optimización económica y las herramientas de la metrología química.Una aproximación puede hallarse en (1)

OBJETIVOS Y METAS

Desarrollar una metodología de monitoreo ambiental que permita minimizar los costos asociados a los riesgos de pérdidas balanceados con aquellos asociados a la amplitud de la caracterización de un suelo potencialmente contaminado.

La metodología es válida para la invetigación de cualquier tipo de matriz donde se supone una contaminación distribuída espacial y/o temporalmente.

METODOLOGIA

La obtención de información confiable implica la aplicación de un proceso de medida que permita obtener muestras representativas e insesgadas,es decir sin errores sistemáticos.

Esto implica la definición detallada y documentada de todas las etapas del proceso y las medidas de aseguramiento de la calidad en cada una de ellas

Estas definiciones deben tener en cuenta el contexto de las desiciones a tomar,los recursos disponibles y la magnitud delos daños ocasionados por errores probables en la definición a partir de información incompleta

Las etapas a considerar se detallan en la Tabla 1



Tabla 1. Componentes del proceso de medida

ETAPA	COMPONENTE
PREVIA	<ul style="list-style-type: none"> Definición de objetivo del estudio. Definición general y específica del marco geográfica/temporal del muestreo. Definición localización de unidades de muestreo. Relevamiento previo.
MUESTREO	<ul style="list-style-type: none"> Precauciones de seguridad y protección ambiental. Patrón de muestreo. Número de muestras. Frecuencia Método para la localización de los puntos y criterios para la decisión en campo frente a obstáculos. Criterios de Muestreo: Profundidad, Modelo, Normas, Ecosistema, Riesgos. Masa, Volumen de muestra. Herramienta y operación. Inclusión o no de diferentes fracciones. Almacenamiento, rotulación y cadena de custodia. Tratamiento en campo.
PRETRATAMIENTO DE LA MUESTRA	<ul style="list-style-type: none"> Precauciones de seguridad y protección ambiental. Técnicas de submuestreo. Técnicas de composición. Condiciones de pretratamiento para diferentes matrices. Procedimiento de digestión y obtención de la solución de ensayo.
ANALISIS	<ul style="list-style-type: none"> Alcance. Reactivos y materiales. Aparatos y equipos. Procedimiento. Cálculos. Reporte de resultados. Incertidumbre de la medida.
DESARROLLO DE LA METODOLOGIA	<ul style="list-style-type: none"> Estimación de parámetros estadísticos significativos y errores aceptables Estimación de parámetros de costos Definición del modelo Criterios de optimización

RESULTADOS

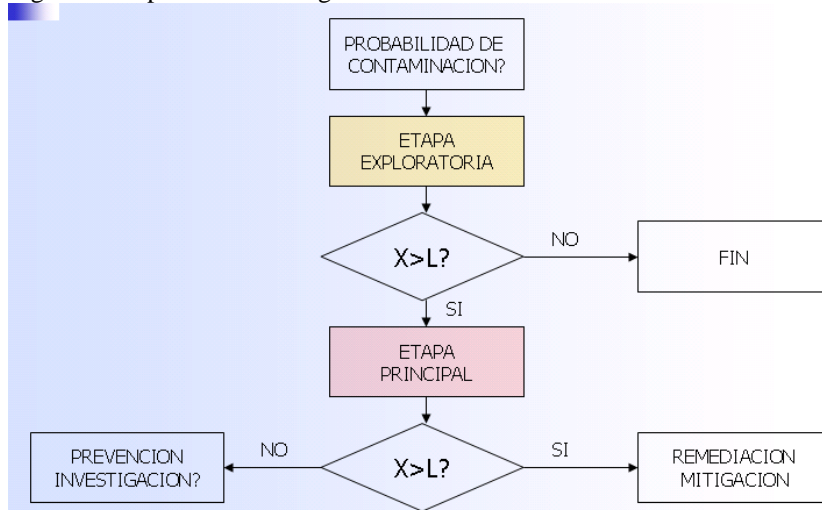
1. Optimización del muestreo

El proceso de toma de decisiones involucra por razones de optimización de recursos dos etapas denominadas Exploratoria y principal.

El objetivo de la etapa exploratoria consiste en definir si la probabilidad de hallar al sitio contaminado es lo suficientemente alta como para definir con mayor precisión si puede asumirse o no esta hipótesis con las consecuencias derivadas. En el desarrollo planteado se considera el valor de un límite legal L como criterio para la toma de decisión estadística aunque esto varía en diferentes esquemas.

El proceso se esquematiza en la Figura 1

Figura 1. Etapas de la investigación



El objetivo de esta etapa consiste en determinar el número de muestreos aceptables para la toma de decisiones involucradas.

Estas decisiones son diferentes para las dos etapas del muestreo: Exploratorio y principal.

2-. Formulación y fundamento

Para evaluar el número de muestras se utilizará la técnica estadística denominada Test de Hipótesis.

Para el caso en estudio, el test formula una hipótesis (denominada Hipótesis nula) en relación al valor medio poblacional del sitio que debe ser rechazada o aceptada a partir de los datos experimentales obtenidos, es decir a partir del valor medio obtenido para cada sitio.

Para cualquiera de las dos etapas la hipótesis seleccionada es que el valor medio verdadero del sitio excede un valor límite preestablecido que denominaremos nivel estadístico de acción: μ_0

Al valor obtenido de Normas, documentos técnicos o evaluación de riesgo utilizado como límite práctico de acción para la toma de decisiones (por ejemplo 400ppm de Pb para la EPA) le denominaremos L

El valor del nivel estadístico de acción μ_0 puede fijarse igual o mayor que L).

En lenguaje estadístico esto se formula como:

Hipótesis nula, $H_0: \mu > \mu_0$

μ : Valor verdadero de la concentración del contaminante estudiado en el sitio

μ_0 : Nivel estadístico de acción definido.



Cuando se toma una desición a partir de los datos experimentales se pueden cometer dos tipos de errores denominados Tipo I y Tipo II.

El error Tipo I tiene una probabilidad de ocurrencia α e implica rechazar la hipótesis nula siendo esta cierta. De acuerdo a la forma en que hemos definido esta hipótesis, este error tiene consecuencias para la salud ya que implica considerar que el suelo no está contaminado cuando en realidad lo está.

El error Tipo II tiene una probabilidad de ocurrencia β e implica aceptar la hipótesis nula siendo esta falsa. De acuerdo a la forma en que hemos definido esta hipótesis, este error tiene impacto directo en los recursos económicos ya que implica realizar acciones de remediación, mitigación, u otras cuando el sitio no está realmente contaminado.

La relación entre el número de muestras y la magnitud de los diferentes errores puede visualizarse a partir de la denominada curva de potencia según se visualiza en la figura 2

Esta curva consiste en la representación gráfica de la Probabilidad de aceptación de la hipótesis nula a partir de los datos experimentales (P) vs el valor verdadero de la media poblacional μ

Como se observa, para valores de μ menores al nivel estadístico de acción μ_0

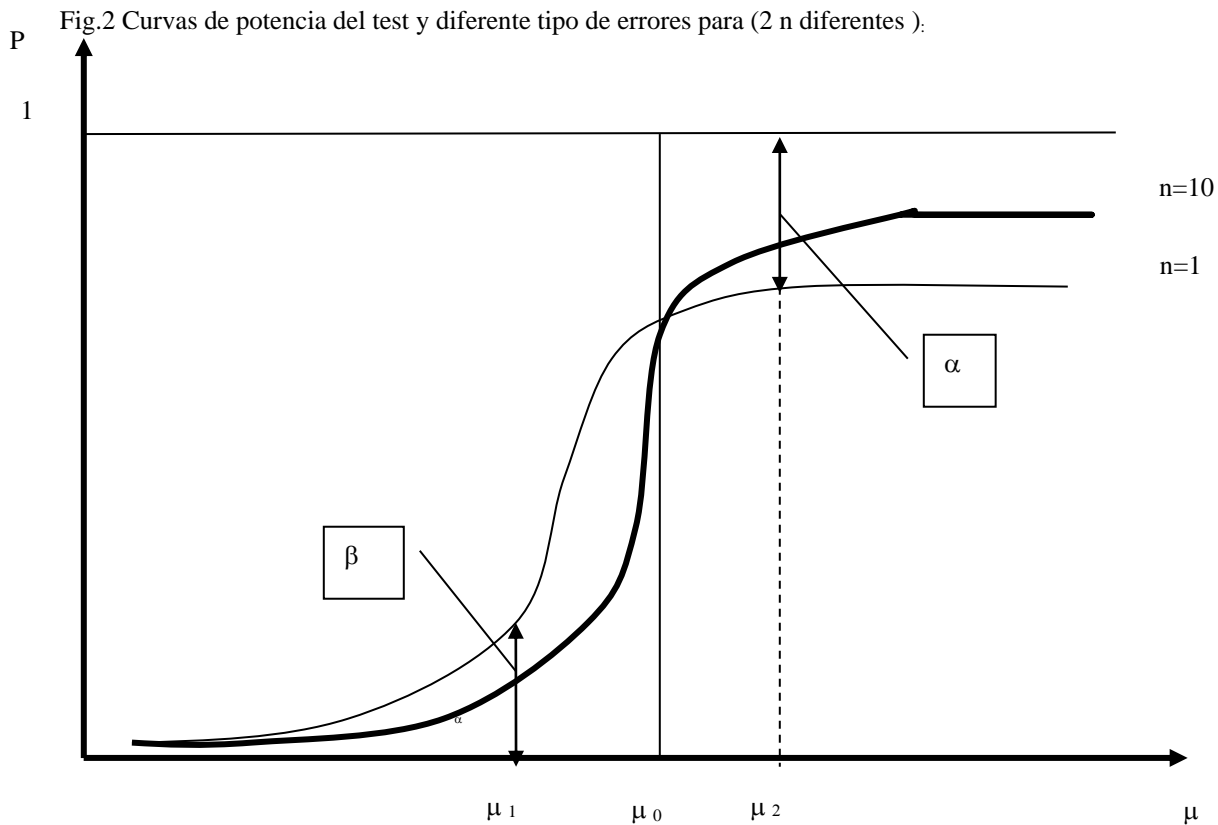
, la probabilidad P de aceptación de la hipótesis nula corresponde a β ya que $\mu < \mu_0$

En cambio, para valores de μ mayores al nivel de acción μ_0 , $1-P$ corresponde a α , ya que $\mu > \mu_0$

De acuerdo al ejemplo representado en la figura, al aumentar el número de muestras n (de 1 a 10 en el ejemplo) se obtienen menores valores de α y β para los mismos valores de μ (μ_1 y μ_2 en el ejemplo)

El primer paso para estimar el número de muestras consiste en fijar un valor de α aceptable para un valor dado de μ_0 . (por ejemplo $\mu_0 = L$ en la Figura 33)

Este valor se fija de acuerdo a criterios de protección de la salud entre 1 y 5%, es decir, se tolerará este tipo de error entre 1 y 5 veces de cada 100.



)



Esta curva consiste en la representación gráfica de la Probabilidad de aceptación de la hipótesis nula a partir de los datos experimentales (P) vs el valor verdadero de la media poblacional μ

Como se observa, para valores de μ menores al nivel estadístico de acción μ_0

, la probabilidad P de aceptación de la hipótesis nula corresponde a β ya que $\mu < \mu_0$

En cambio, para valores de μ mayores al nivel de acción μ_0 , $1-P$ corresponde a α , ya que $\mu > \mu_0$

De acuerdo al ejemplo representado en la figura, al aumentar el número de muestras n (de 1 a 10 en el ejemplo) se obtienen menores valores de α y β para los mismos valores de μ (μ_1 y μ_2 en el ejemplo)

El primer paso para estimar el número de muestras consiste en fijar un valor de α aceptable para un valor dado de μ_0 . (por ejemplo $\mu_0 = L$ en la Figura 33)

Este valor se fija de acuerdo a criterios de protección de la salud entre 1 y 5%, es decir, se tolerará este tipo de error entre 1 y 5 veces de cada 100.

En nuestro caso se considerará aceptable un α de 5%, es decir que 1 de cada 20 veces estaremos dispuestos a aceptar que el terreno no está contaminado cuando en realidad lo está.

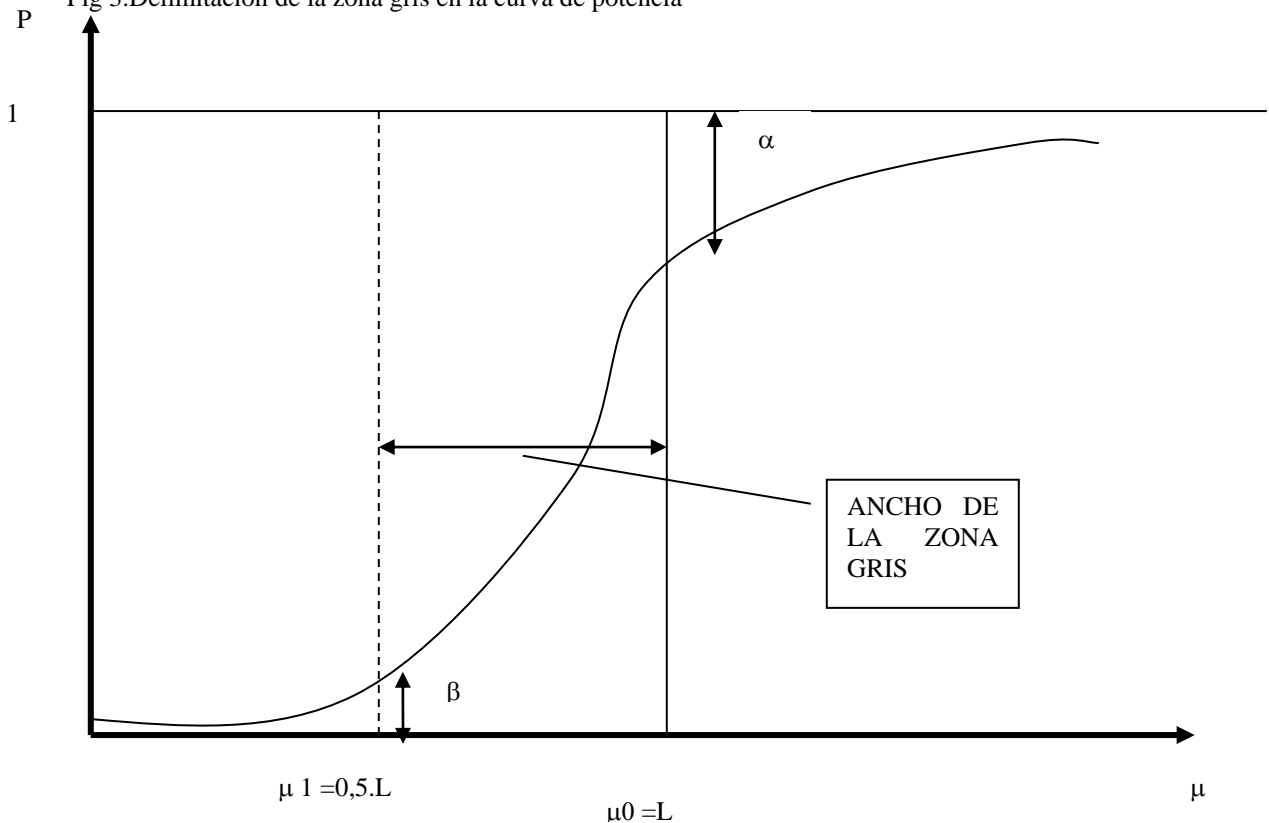
A continuación, se estima β para un valor de μ_1 fijo ($0,5L$ en la figura 3). La diferencia $\Delta = \mu_0 - \mu_1$ se denomina ancho de la zona gris y corresponde al intervalo en el cual son tolerables errores tipo I elevados.

Esto significa que entre $0,5L$ y L los costos de aumentar el número de muestras justifican asumir los costos de aceptar la hipótesis nula ($\mu > \mu_0$) aunque sea falsa.

En nuestro caso, si se trata de la etapa principal del muestreo, esto

implica aceptar que es económicamente conveniente para un número de muestras dado, decidir tomar alguna acción de remediación o mitigación aunque el valor real esté entre μ_1 y μ_0 ($0,5L$ y L en el ejemplo).

Fig 3. Delimitación de la zona gris en la curva de potencia





Si se trata de la etapa exploratoria esto implica aceptar que es económicamente conveniente para un número de muestras dado, decidir continuar con la investigación principal aunque el valor real esté entre $0,5 L$ y L . Al costo de estas acciones se le denominará costo de falsa aceptación.

3-Suposiciones del modelo

El modelo presentado tiene las siguientes suposiciones.

a-La distribución de los datos en Normal. Esta hipótesis es válida para un número de muestras no pequeño. Para muestras compuestas $n > 2$ contempla la media de 8 muestras simples y por lo tanto la aproximación Normal es razonable

b-La varianza corresponde exclusivamente a los errores aleatorios del proceso de medida. Esta suposición es válida cuando la varianza del error sistemático es despreciable respecto a la del aleatorio.

4-Planteamiento del modelo

4.1-Etapa principal

Hipótesis nula. $\mu > \mu_0$

Decisión: Si valor medio experimental $> X_c$ entonces remediar/mitigar

X_c : Valor crítico por encima del cual se acepta la hipótesis nula. Este valor es el límite práctico estadístico de acción y es siempre menor al estadístico. μ_0

(Ver 5.2.2)

La función de costo total para esta etapa que se define por

COSTO TOTAL = COSTO FIJO + COSTO VARIABLE + COSTO POR FALSA ACEPTACION

$$C_t = C_F + C_v \cdot p + C_R \cdot \beta_1$$

$$p_1 = \min(C_F + C_v \cdot p + C_R \cdot \beta_1)$$

C_t : Costo total del estudio principal. Función a optimizar

C_F : Costos fijos del estudio. Incluyen costos de planificación, traslado, viáticos y desgaste de equipos.

C_v : Costos variable proporcionales al número de muestreos p e incluyen:

- Costos variables de muestreo
- Horas de analista
- Horas de supervisor de laboratorio
- Amortización de equipos
- Reactivos y consumibles

p : Número de muestras

p_1 : Número óptimo de muestras para la etapa principal

C_R : Costos de remediación/mitigación: Corresponden a los costos asociados a la remediación, aislamiento de la zona contaminada, relocalización de viviendas o cambio de uso del sitio.

β_1 : Probabilidad de falsa aceptación de la hipótesis nula para un valor prefijado de $\mu = \mu_1$

Se estima de acuerdo a:

$$\beta_1 = \Phi(Z_{1-\alpha} - \Delta \cdot p^{1/2} / \sigma)$$

Φ : Función de distribución normal

$Z_{1-\alpha}$: Fractil $1-\alpha$ de la variable normal estandarizada Z

α : Probabilidad de falso rechazo de la hipótesis nula

σ : Varianza poblacional. Se estima con S_T (Componente aleatoria del error, Ver pg)

μ_1 : Valor verdadero de la concentración del contaminante para el cual se optimiza el riesgo β_1

Δ : Ancho de la zona gris $\Delta = \mu_0 - \mu_1$



4.2- Etapa exploratoria

Hipótesis nula, $\mu > \mu_0$

Decisión: Si valor medio experimental $> X_c$ entonces continuar con la etapa principal.

La función de costo total para esta etapa que da definida por

COSTO TOTAL = COSTO FIJO + COSTO VARIABLE + COSTO POR FALSA ACEPTACION COSTO POR FALSA ACEPTACION $= (C_F + C_v \cdot (p_1 - p)) \cdot \beta_2$

En este caso, la falsa aceptación implica tomar el número de muestras que faltan para completar el número p_1 calculado para la etapa principal.

$C_t = C_F + C_v \cdot p + (C_F + C_v \cdot (p_1 - p)) \cdot \beta_2$

$p_2 = \min(C_F + C_v \cdot p + (C_F + C_v \cdot (p_1 - p)) \cdot \beta_2)$

C_t : Costo total del estudio preliminar. Función a optimizar

C_F : Costos fijos del estudio Incluyen costos de planificación, traslado, viáticos y desgaste de equipos.

C_v : Costos variable proporcionales al número de muestreos p e incluyen:

- Costos variables de muestreo
- Horas de analista
- Horas de supervisor de laboratorio
- Amortización de equipos
- Reactivos y consumibles

p : Número de muestras

p_2 : Número óptimo de muestras para la etapa exploratoria

β_2 : Probabilidad de falsa aceptación de la hipótesis nula para un valor prefijado de $\mu = \mu_2$

Se estima de acuerdo a:

$\beta_2 = \Phi(Z_{1-\alpha} - \Delta \cdot p^{1/2} / \sigma)$

Φ : Función de distribución normal

$Z_{1-\alpha}$: Fractil $1-\alpha$ de la variable normal estandarizada Z

α : Probabilidad de falso rechazo de la hipótesis nula

σ : Varianza poblacional. Se estima con S_T (Ver pg 106)

μ_2 : Valor verdadero de la concentración del contaminante para el cual se optimiza el riesgo

Δ : Ancho de la zona gris. $\Delta = \mu_0 - \mu_2$

5-Definición de parámetros estadísticos del modelo

5.1 -Etapa Principal

Para estudiar el significado y alcance del modelo se realizarán algunas simplificaciones que no afectan las conclusiones.

Ya que los costos fijos C_F no influyen en el valor de p_1 no serán tenidos en cuenta.

La ecuación queda:

$p_1 = \min(C_v \cdot p + C_R \cdot \beta_1) = \min(p + R \cdot \beta_1)$ siendo $R = C_R / C_v$

Se expresará el cociente Δ/σ en función del coeficiente de variación CV.

$\Delta/\sigma = (1/CV) \cdot ((\mu_0 / \mu_1) - 1)$

$\beta_1 = \Phi(Z_{1-\alpha} - (1/CV) \cdot ((\mu_0 / \mu_1) - 1) \cdot p^{1/2})$

$CV = \sigma / \mu_1$

CV: Coeficiente de variación.

El coeficiente de variación se supone constante para el sitio.

Se selecciona $\alpha = 5\%$ para todo valor de μ_0 seleccionado. Este valor se considera adecuado para la protección de la salud humana.



Se selecciona $\mu_1=0,5.L$

(Recordar que L es a un valor obtenido de Normas o documentos técnicos o evaluación de riesgo)

Se analizará el modelo para dos valores del límite estadístico de acción

Hipótesis 1: $\mu_0=L$

Hipótesis 2: $\mu_0=1,5.L$

5.2-Etapa Exploratoria

Para estudiar el significado y alcance del modelo se realizarán algunas simplificaciones que no afectan las conclusiones.

Ya que los costos fijos C_F no influyen en el valor de p_1 no serán tenidos en cuenta.

La ecuación queda:

$$p_2 = \min(C_F + C_v \cdot p + (C_F + C_v \cdot (p_1 - p)) \cdot \beta_2) \\ = \min(.p + (r + p_1 - p) \cdot \beta_2) \text{ siendo } r = C_F / C_v.$$

Se expresará el cociente Δ/σ en función del coeficiente de variación CV.

$$\Delta/\sigma = (1/CV) \cdot ((\mu_0 / \mu_2) - 1)$$

$$\beta_2 = \Phi(Z_{1-\alpha} - (1/CV) \cdot ((\mu_0 / \mu_2) - 1) \cdot p^{1/2})$$

$$CV = \sigma / \mu_1$$

CV: Coeficiente de variación.

El coeficiente de variación se supone constante para el sitio.

Se selecciona $\alpha = 5\%$ para todo valor de μ_0 seleccionado. Este valor se considera adecuado para la protección de la salud humana.

Se selecciona $\mu_2=0,5.L$

(Recordar que L es a un valor obtenido de Normas o documentos técnicos o evaluación de riesgo)

Se analizará el modelo para dos valores del límite estadístico de acción

Hipótesis 1: $\mu_0=L$

Hipótesis 2: $\mu_0=2,5.L$

5.3-Estudio completo

El estudio completo implica la consideración de las etapas exploratoria y principal ya que el número de muestras a extraer en la etapa exploratoria es función del número de muestras correspondiente a la principal p_1

La alternativa a estudiar se presenta resumidamente en la Tabla 2

Tabla 2. Combinación de parámetros a estudiar

Investigación Definitiva			Investigación Exploratoria		
μ_0	μ_1	$\alpha(\%)$	μ_0	μ_1	$\alpha(\%)$
L	0,5.L	5	L	0,5.L	5

6.-Análisis del modelo

Se analizarán los valores óptimos de muestras para la opción y cada una de las etapas :exploratoria (óptimo= p_1) y principal (óptimo= p_2)

Para cada valor de p_1 y p_2 se estimará el valor de β_1 y β_2 correspondiente, es decir los riesgos de falsa aceptación de la hipótesis nula para $\mu = 0,5L$.



Se analizará el modelo para un rango amplio de valores de R(R entre 10 y 1000).

Los parámetros del modelo serán:

- Coeficiente de variación.CV: $CV=\sigma/\mu$ donde σ es la varianza poblacional y μ es el valor medio verdadero de la concentración del contaminante en el sitio.
- Relación de costos R: $R= C_R/ C_v$ donde C_R son los costos de remediación/mitigación es decir, aquellos que corresponden a los costos asociados a la remediación,aislamiento de la zona contaminada,relocalización de viviendas o cambio de uso del sitio y C_v son los costos variables (por muestra)e incluyen a los costos variables de muestreo,las horas de analista y supervisor de laboratorio,la amortización de equipos y los reactivos y consumibles.
- Relación de costos r: $r= C_F / C_v$ donde C_F son los costos fijos del estudio e incluyen costos de planificación.traslado,viáticos y desgaste de equipos y C_v son los definidos en el párrafo anterior. Este parámetro se considera fijo para todo el estudio y se le asigna un valor de $r=4$.Este valor supone un costo fijo estimado en \$1500 por muestreo y un costo variable C_v estimado en \$375.
- Límite práctico de acción L :Valor obtenido de Normas , documentos técnicos o evaluación de riesgo utilizado como límite práctico de acción para la toma de desiciones.

7.-Resultados

Los resultados numéricos se presentan en en las Tablas 3 y 4

Tabla 3.Estimacion de número de muestras óptimo en la etapa principal (p_1) para diferentes valores de CV y R en la Opción 1.

R	CV	0.2	0.6	1	1,6	2	3	4	6	10	20	30	40	50	100	1000
10	p1	1	3	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	β_1	0.04	10.71	36.12	84.61											
25	p1	1	4	8	9	4										
	β_1	0,04	4,60	11,8	17,32	74,05										
50	p1	1	5	10	17	19	5	2	1	1	1	1	1	1	1	1
	β_1	0.04	1.87	6.46	17.36	29.64	81.58	90.17	93.03							
100	p1	1	6	12	19	24	20	17	1	1	1	1	1	1	1	1
	β_1	0.04	0.73	3.41	14.02	21.05	56.13	73.04	93.03							
500	p1	1	7	17	37	52	93	133	186	36	2	1	1	1	1	1
	β_1	0.04	0.28	0.66	1.55	2.49	5.82	10.78	26.49	86.37	94.22	93.88				
1000	p1	1	8	22	43	61	114	172	290	376	11	4	2	1	1	1
	β_1	0.04	0.04	0.05	0.07	0.11	0.25	0.47	1.07	3.11	13.68	34.43	72.89	90.39	94.38	94.94



Tabla4..Estimación de Número de muestras óptimo en la etapa exploratoria(p 2) para diferentes valores de CV y R en la opción 1

R	CV	0,6	1	1,6	2	3	4	6
10	p2	2	-	-	-	-	-	-
	β2	23,82	-	-	-	-	-	-
25	p2	2	4	-	-	-	-	-
	β2	23,8	36,12	-	-	-	-	-
50	p2	3	2	8	-	-	-	-
	β2	10,72	27,72	45,12	-	-	-	-
100	p2	3	5	9	-	-	-	-
	β2	10,72	27,72	40,90	-	-	-	-
500	p2	3	7	13	19	36	53	-
	β2	10,72	19,76	27,14	29,65	36,13	43,05	-
1000	p2	3	8	15	21	42	65	114
	β2	10,72	21,6	21,90	22,4	30,31	35,54	44,64

8- Selección del modelo y aplicación en el protocolo

8.1-Criterios de selección

Se seleccionará una opción y número óptimo de muestras considerando que quien haga uso del protocolo adoptará el Límite práctico de acción L (Valor obtenido de Normas, documentos técnicos o evaluación de riesgo utilizado como límite práctico de acción para la toma de desiciones) como límite práctico de desición, es decir se supondrá para las dos opciones y cada una de las etapas la ecuación .

$$X_c=L$$

8.2- Analisis

El límite práctico estadístico de acción X_c definido como el valor por encima del cual acepto la hipótesis nula (es decir que el valor medio verdadero del contaminante en el sitio es superior al límite estadístico de desición μ_0) se estima mediante la ecuación

$$X_c = \mu_0 - Z_{1-\alpha} \cdot \sigma / p^{1/2}$$

Para la etapa principal $\mu_0 = L$, por lo tanto resulta para cualquier valor de σ y p será $\alpha=0,5$ ya que de la ecuación resulta $Z_{1-\alpha} = 0$.

Esto significa que no se puede considerar el valor de L como límite práctico de acción sin asumir probabilidades elevadas de falso rechazo de que el sitio este contaminado, α .

En caso de aceptar la opción 1, el mantenimiento del valor de $\alpha=5\%$ implica adoptar límites prácticos de acción X_c que se presentan en la Tabla 5 para diferentes Cv y p1.

Tabla 5: Valores de X_c/L para diferentes CV y p1 para Opción 1, Etapa principal

CV	Xc/L				
	p1=1	p1=2	p=3	p1=4	p1=5
0,2	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9
0,6	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8
1	0,2	0,4	0,5	0,6	0,6
1,6	-0,3	0,1	0,2	0,3	0,4
2	-0,7	-0,2	0,0	0,2	0,3



3	-1,5	-0,8	-0,4	-0,2	-0,1
---	------	------	------	------	------

Observese por ejemplo que para un CV de 2, si se extrae una muestra se debe aceptar que el sitio está contaminado para valores mayores que 0,2L (Por ejemplo 80ppm de plomo si utilizo los criterios de EPA)

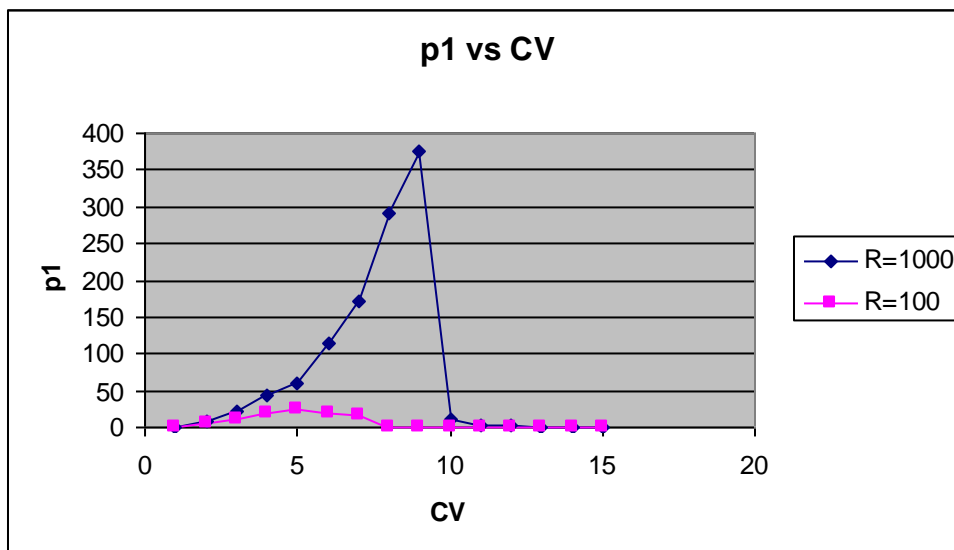
Para CV mayores o iguales a 3 se acepta que está contaminado para valores por encima del límite de detección del método.

DISCUSION

1.- Etapa Principal

En la figura 4 se presenta la variación de p_1 con CV para diferentes valores de R.

Figura 4. Variación de p_1 con CV para diferentes valores de R.



Como se observa, el valor del óptimo p_1 (Opción 1) presenta un máximo con CV para una relación fija de costo remediación-costo variable (R). Para cualquier relación de costos R, valores bajos de CV implican varianzas bajas en relación al valor medio de concentración, es decir sitios con baja variabilidad o probabilidad de contener zonas calientes. De acuerdo al gráfico, estos sitios requieren un número de muestras menor que para sitios con variabilidad relativa alta (para decidir con los valores de error predefinidos).

A partir de un número determinado de muestras, un aumento de CV requerirá un número cada vez menor de muestras. Esta disminución sin embargo esta disminución de p_1 se realiza a expensas de un incremento elevado del riesgo de falsa aceptación β .

Como se observa este comportamiento no es el mismo independientemente de R. Un aumento de R (mayores costos de remediación/mitigación) para un mismo valor de CV (misma variabilidad relativa) implica un mayor número de muestras.

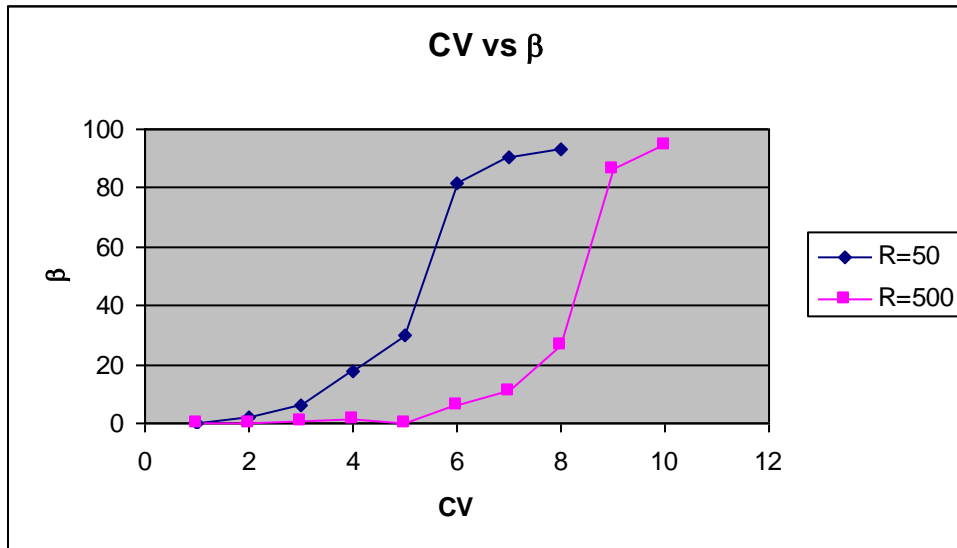
Esto está originado en el incremento de los costos asociados a una remediación innecesaria en relación a los costos de muestreo. Es decir, resulta económicamente óptimo aumentar el número de muestras cuando los costos de remediación/mitigación aumentan.

Al disminuir L para un mismo sitio al ser la varianza del error aleatorio constante (S_T), esto implica un incremento de CV y por lo tanto un incremento del número óptimo de muestras p_1 . Es decir que valores más exigentes en L (Por ejemplo 140 ppm Pb para la Agencia Canadiense frente a 400ppmPb para la EPA) el número óptimo de muestras necesario es mayor.



En la figura 5 se presenta la variación del riesgo β_1 con CV para diferentes R

Figura 5. Variación del riesgo β_1 con CV para diferentes R



Como se observa en la figura, al aumentar la variabilidad relativa (CV) del sitio para una relación R fija, el valor de β_1 aumenta. Este comportamiento se explica por el hecho de que al aumentar la dispersión relativa de los valores en el sitio aumenta la probabilidad de aceptar la hipótesis nula para el número de muestras óptimo. Este valor de β_1 podría disminuirse aumentando el número de muestras pero esto no resultaría económico en comparación con los costos de remediación/ mitigación R.

Considerando tolerable un error β_1 máximo de un 20%, si los datos obtenidos en la etapa exploratoria nos deciden a continuar con la etapa principal y $\beta_1 > 20\%$ se puede decidir remediación/mitigación sin realizar muestreo en la etapa principal.

De acuerdo a este criterio en sitios con bajos valores de R y variabilidad moderada la etapa principal puede obviarse y pasar directamente a la remediación /mitigación. No obstante, no es recomendable aplicar este criterio para sitios con variabilidad $> 0,5$ como criterio conservador

Sitios con valores altos de R requieren poseer mayor variabilidad para efectivizar este criterio.

Como criterio general, cuando el CV puede presumirse o estimarse como mayor a 1,5 se sugiere realizar una división del sitio y aplicar el protocolo y el modelo a cada zona. (esto se denomina muestreo estratificado)

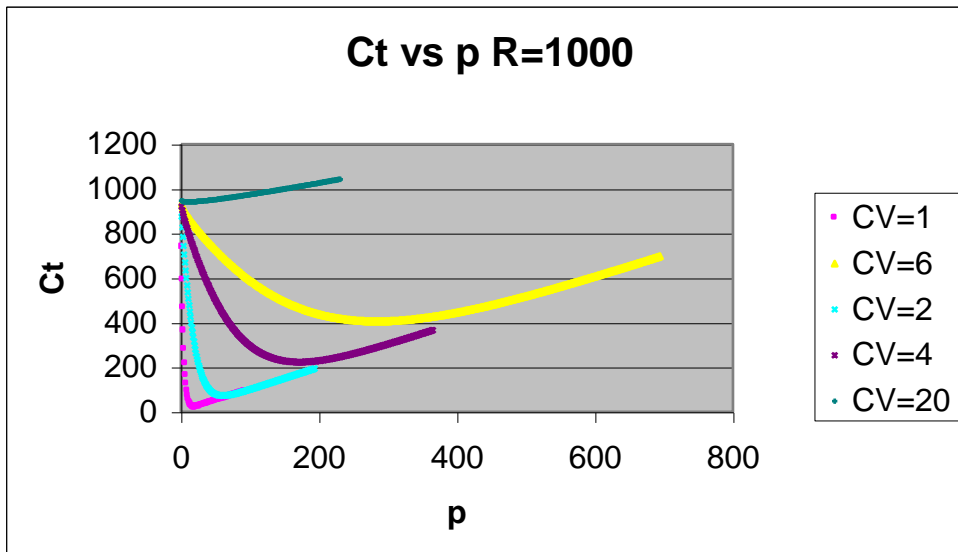
A modo de ejemplo, si luego de la fase exploratoria encontramos $CV=2, R=500$ el óptimo para todo el sitio sería $p_1=133$ muestreos.

Si dividimos este sitio en 5 partes y estimamos en una de ellas $CV=3$ (la mayor responsable de la variabilidad) y en las 4 restantes $CV=1$ optaríamos por remediar directamente la parte con $CV=3$ y determinaríamos el p_2 óptimo para cada estrato con $CV=1$ (que sería menor que 48 muestras en total.)

Con este enfoque los recursos se invierten en obtener información de la zona con más variabilidad y el costo total del estudio resulta menor.

En la figura 6 se observa el comportamiento del costo total (C_t) con el número de muestreos (p) para diferentes valores de f y un R dado.

Figura 6. Costo total (Ct) con el número de muestreos(p) para diferentes valores de f y un R dado



Al aumentar CV el mínimo se desplaza hacia la derecha (aumenta p_1) mientras la curva se suaviza y aplana. Apartir de un CV dado el mínimo comienza a desplazarse a la izquierda y la curva se asimila paulatinamente a una recta para valores elevados de CV (corresponde a $p_1=1$ y valores de β elevados)

CONCLUSIONES

Es viable desarrollar y validar un protocolo integrado para la evaluación de la contaminación en medios físicos diversos con criterios internacionales modernos en metrología química aplicada.

Una propuesta detallada de protocolo se presenta en el apéndice F. Está basado en los fundamentos expuestos en el La aplicación de los protocolos desarrollados puede considerarse una herramienta confiable para la toma de decisiones ya que se fundamenta en los conocimientos más actuales sobre la materia.

La definición detallada de los componentes del protocolo, su validación (evaluación de las características del método y aptitud para el uso) así como el desarrollo de un modelo para minimizar los costos a riesgos aceptables son los fundamentos teórico-prácticos que fundamentan al protocolo.

Los conceptos generales modernos de metrología química consensuados a partir de la Norma ISO 17025 (Incertidumbre, Aseguramiento y Control de la calidad, Validación) y los desarrollos particulares formulados por IUPAC, EURACHEM y RSC en varias publicaciones han resultado apropiados para la formulación coherente del proceso integral de medida (muestreo, tratamiento, análisis)

Las herramientas de la estadística descriptiva, de la inferencia estadística y del diseño de experiencias han resultado un soporte matemático consistente para la formulación de las características de calidad del protocolo y para la selección de alternativas.

El marco de aplicación del protocolo como herramienta de gestión debería buscar el enfoque transdisciplinario, es decir aquel que sin jerarquías predeterminadas, busca crear un nuevo saber, sin excluir al ser humano afectado del problema de la elaboración de opciones y sin relegar el valor de sus saberes particulares, involucrando múltiples disciplinas actuando horizontalmente (Química, Toxicología, Medicina, Geología, asistencia social, economía, planificación, política, otras)

El protocolo desarrollado no es un punto de llegada sino de partida que requiere profundización, probablemente cambios y mejoras a partir de la cooperación entre las partes interesadas.



En todos los casos son críticos la definición precisa de los objetivos del monitoreo y los compromisos a aceptar en el balance de riesgos así como la confiabilidad de los resultados analíticos obtenidos en todo el proceso de medida: muestreo, traslado al laboratorio, tratamiento de la muestra, ensayo, procesamiento de la información.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Trelles ,G., Dol,I., Feola,G., Fuentes ,J., Knochen., Bossi,J., Desarrollo y validación de protocolos para la caracterización de concentración superficial de contaminantes metalicos en suelos para distintos usos. Tesis de Maestria I.Q Gualberto Trelles, Fctad. Química, U.D.E.L.A.R. 2007
2. Bernard, T. E., Extending the Concept of Data Quality Objectives to Account for Total Sample Variance. Principles of Environmental Sampling, 2ºEd, 1996, Cap9, U.S.A
3. Borgman, L.E. , Cost Effective Sampling for Spatially Distributed Phenomena Principles of Environmental Sampling, 2ºEd, 1996, Cap39, U.S.A
4. Egli, H. , Dassenakis, M., Garelick, H., Van Grieken, R., Peijnenburg , W.J.G.M., Klasinc ,L., Korde, W., Priest, N., Tavares, T., Minimum Requirements for reporting analytical data for environmental samples, IUPAC Technical Report, Pure Appl. Chem., 2003, (75), 1097-1106
5. ISO 10381-1, Soil Quality-Sampling Part 1: Guidance on the Design of Sampling Programmes, 2002