

# Estimación recursos y reservas proyecto de yodo

Andrés Beluzán  
Ing. Civil Minas  
P.C. Geoestadística #215



**ABelco**

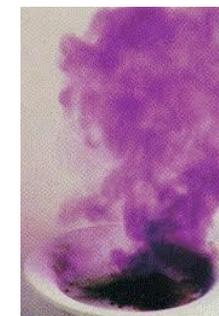
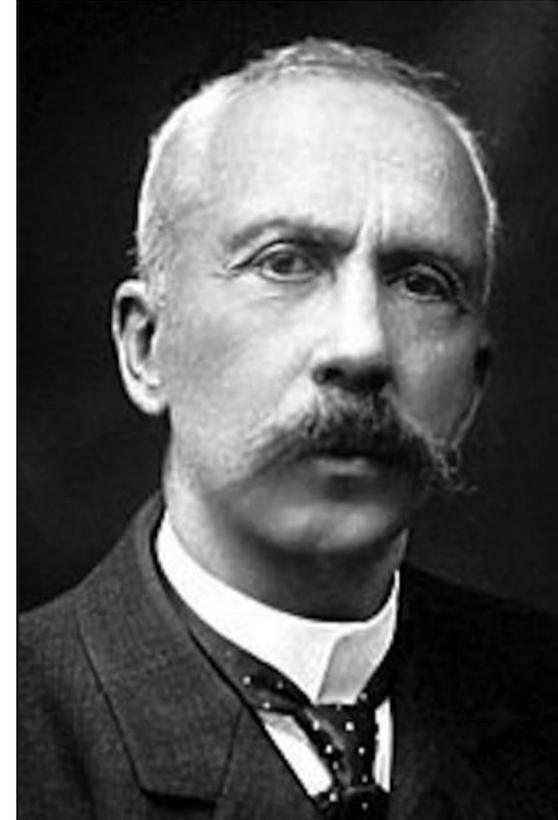
[www.abelco.cl](http://www.abelco.cl)

# Contenido

- Introducción al yodo, descubrimiento e historia.
- Propiedades y usos del Yodo.
- Yacimientos de Yodo, geología.
- Estimación de Recursos y Reservas.

# Descubrimiento

- El descubrimiento del yodo se realizó en el período 1811-1813, era la época de las guerras napoleónicas y Francia tenía bloqueada la importación de Nitrato de Potasio componente esencial de la pólvora.
- Bernard Courtois, químico francés, generó en remplazo Nitrato de Sodio a partir de una reacción de nitrato de calcio  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  con carbonato de sodio  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .
- El Carbonato Sodio se obtenía de cenizas de algas marinas traídas de la costa las que tienen un alto porcentaje de yodo (10 a 20%).
- Al añadir ácido sulfúrico al proceso observó vapores violetas los cuales al condensarse dejaron costras de material gris metálico.
- En 1813 fue reconocido como un nuevo elemento por sus amigos los físicos y químicos Charles Bernard y Nicolás Clement.



Yodo viene del griego ἰώδης (iodes=color violeta)

# Historia

- En 1866, Pedro Gamboni patenta su sistema de extracción del yodo del Caliche agregando sulfato y nitrato de cobre y sulfato y protosulfato de hierro a las aguas madres del salitre.
- Guerra del pacífico (1879-1883) , Chile triunfa, e incorpora Antofagasta y Tarapacá.
- En 1910 los derechos de exportación del salitre y yodo representaba un 55% de los ingresos del país, alcanzando el 80% a fines del 1913.
- Chile se convirtió en el principal productor mundial de salitre y se produce un auge económico nunca antes visto, impulsando grandes cambios sociales y económicos.
- 1914, 1era Guerra Mundial, Fritz Haber desarrolla el nitrato sintético, junto con la gran depresión de 1930 se produce el derrumbe de la industria del salitre y del yodo.



# Historia



1931

Se produjo la casi completa paralización del salitre y yodo.

1968

Se crea la Sociedad Química y Minera de Chile, Soquimich, como parte de un plan de reorganizar la industria del salitre.

1971

Soquimich se convierte en una empresa estatal controlada por la Corfo.

1981

Una nueva clausula del código minero otorgó a Corfo y SQM 6 meses de exclusividad para realizar manifestaciones mineras. SQM quedó con mas de 93 mil hectáreas de terreno, incluyendo los mejores yacimientos de salitre y yodo

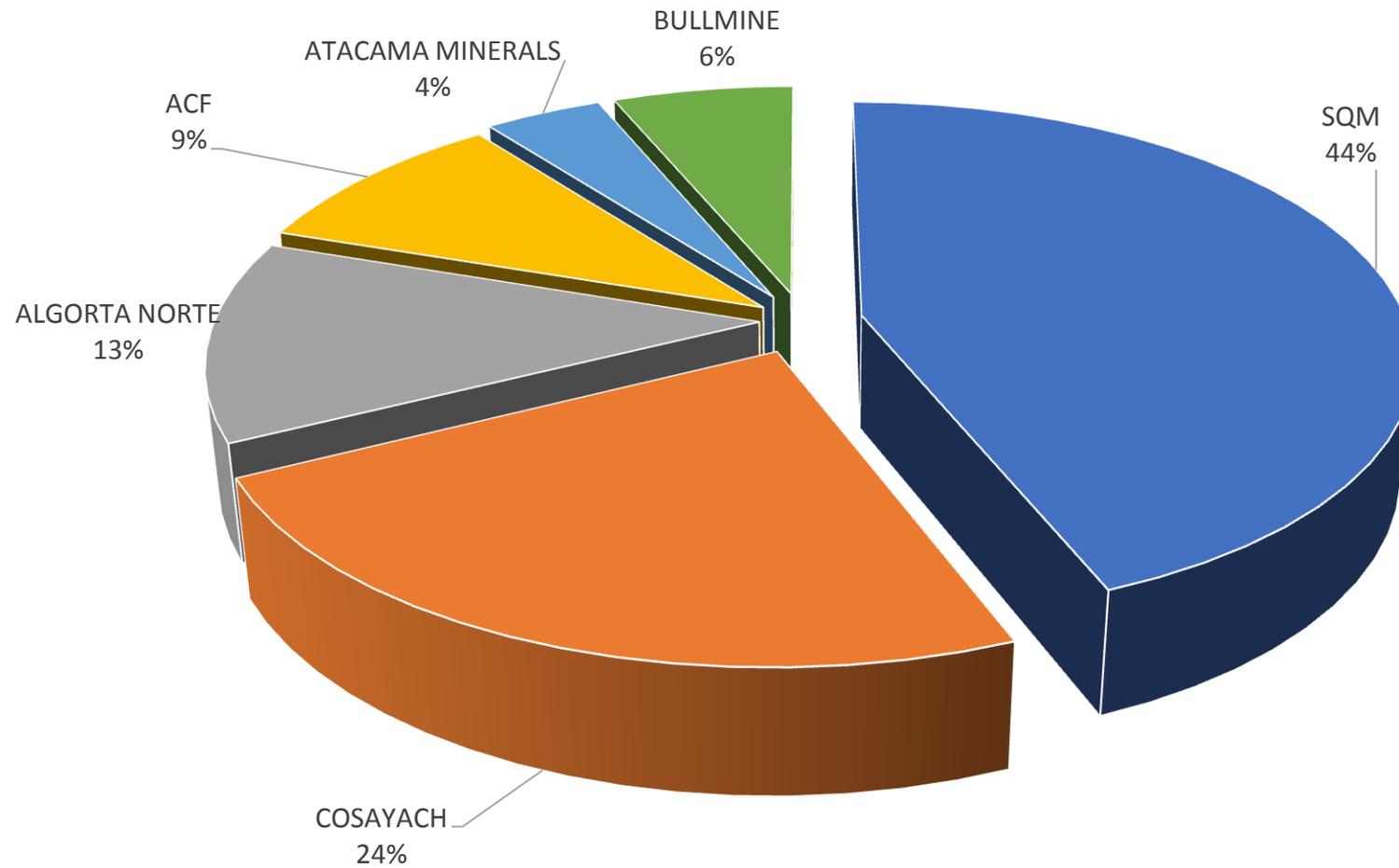
1995

Se firmó el contrato en que Corfo le entrega su parte a SQM hasta el 2030, adjudicándose concesiones mineras y derechos de agua.

2017

SQM es el mayor productor del mundo del yodo, salitre y litio.

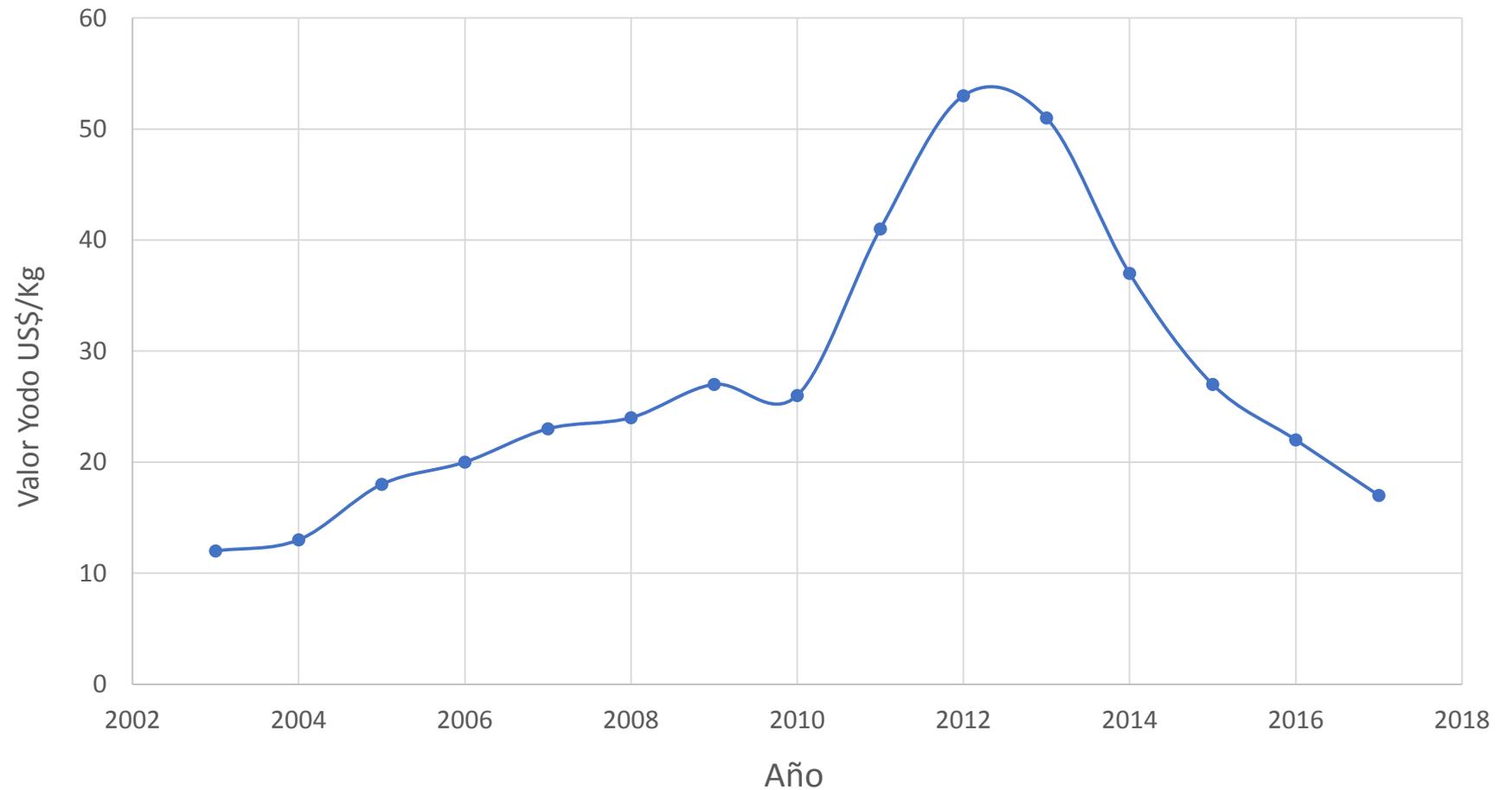
# Producción de Yodo en Chile



Fuente: Análisis de los Recursos Salinos, 2013, Cochilco

## Evolución precio del yodo

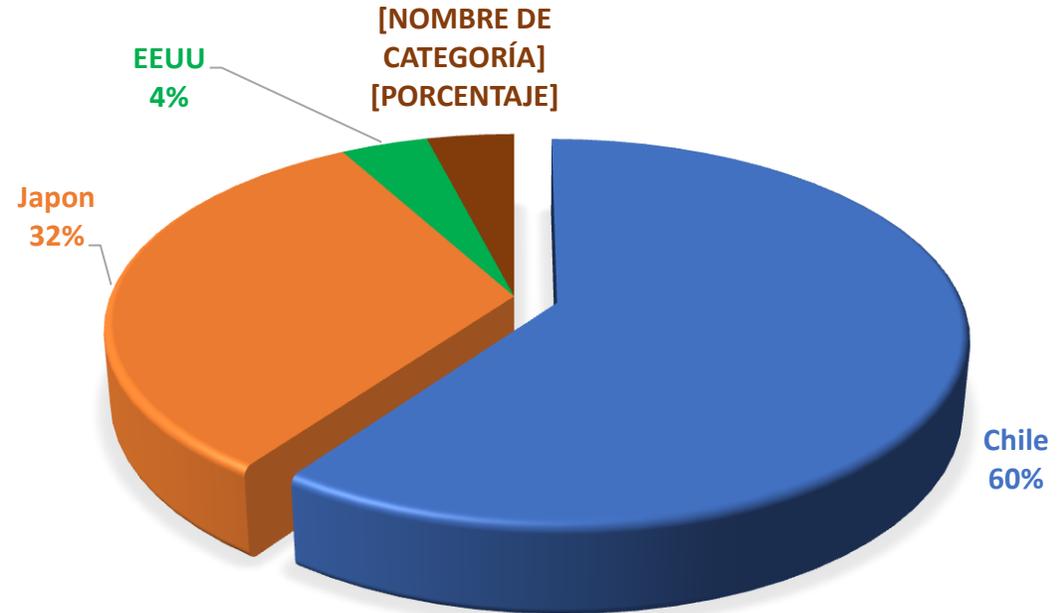
- El mayor precio del yodo se relaciona con el tsunami de Japón donde la población debió tomar pastillas de yodo.
- Hoy el precio del yodo es más bajo que el costo de producción para minas como Bullmine y ACF (costos de producción 22 US\$/Kg aprox)



**¿Dónde está el yodo y  
para que sirve?**

## ¿Donde está?

- El Yodo existe en todas partes. No hay nada en el mundo, donde los métodos analíticos de gran precisión no descubran la presencia de yodo.
- Se encuentra en el mar, en aguas corrientes, plantas, animales y en el hombre.
- En concentraciones que permitan su extracción económica, se estima que el 60% de las reservas de yodo se encuentran asociadas a los depósitos de nitratos en Chile
- En Japón y EE.UU se encuentra el 32% y 4% respectivamente en las salmueras ricas en yodo asociadas a la producción de gas natural.



## ¿Qué es?

- Elemento químico, número atómico 53, pertenece al grupo de los halógenos (del griego formador de sales), es el más pesado de los elementos no metálicos con una masa atómica de 126.9 (g/mol).
- Es un oligoelemento, esto quiere decir que es un elemento químico presente en los seres vivos cuya ausencia o exceso provoca daños a la salud.
- La deficiencia de yodo produce bocio y cretinismo
- Es muy reactivo, en la naturaleza no se encuentra yodo elemental (I<sub>2</sub>). Se encuentra en forma de yoduros en el agua del mar (I<sup>-</sup>), y de yodatos en minerales (IO<sub>3</sub>).



# Usos

- Medios de contraste en rayos X.
- Desinfectantes y Antisépticos (povidona yodada) .
- Productos químicos (tinturas, fotografía).
- Nutrición humana.
- Manufactura de neumáticos.
- Pantallas táctiles, elementos vitales en pantallas de cristal. líquido (WikiLeaks).



# **Yacimientos de Yodo en Chile, geología**

## Yacimientos de Yodo en Chile

- En general, la procedencia de este mineral es fundamentalmente de naturaleza marina, pero al contrario de lo que se espera, su extracción nacional se realiza en pleno desierto de Atacama.
- Las principal fuente de yodo que se encuentran en el desierto son los yacimientos de nitratos.
- También se encuentra yodo en los yacimientos supérgenos de cobre como por ejemplo Mantos de la Luna, Spence, Chuquicamata y Escondida.
- En ambas partes, la presencia de yodo no calza con el origen de los demás elementos que los acompañan.



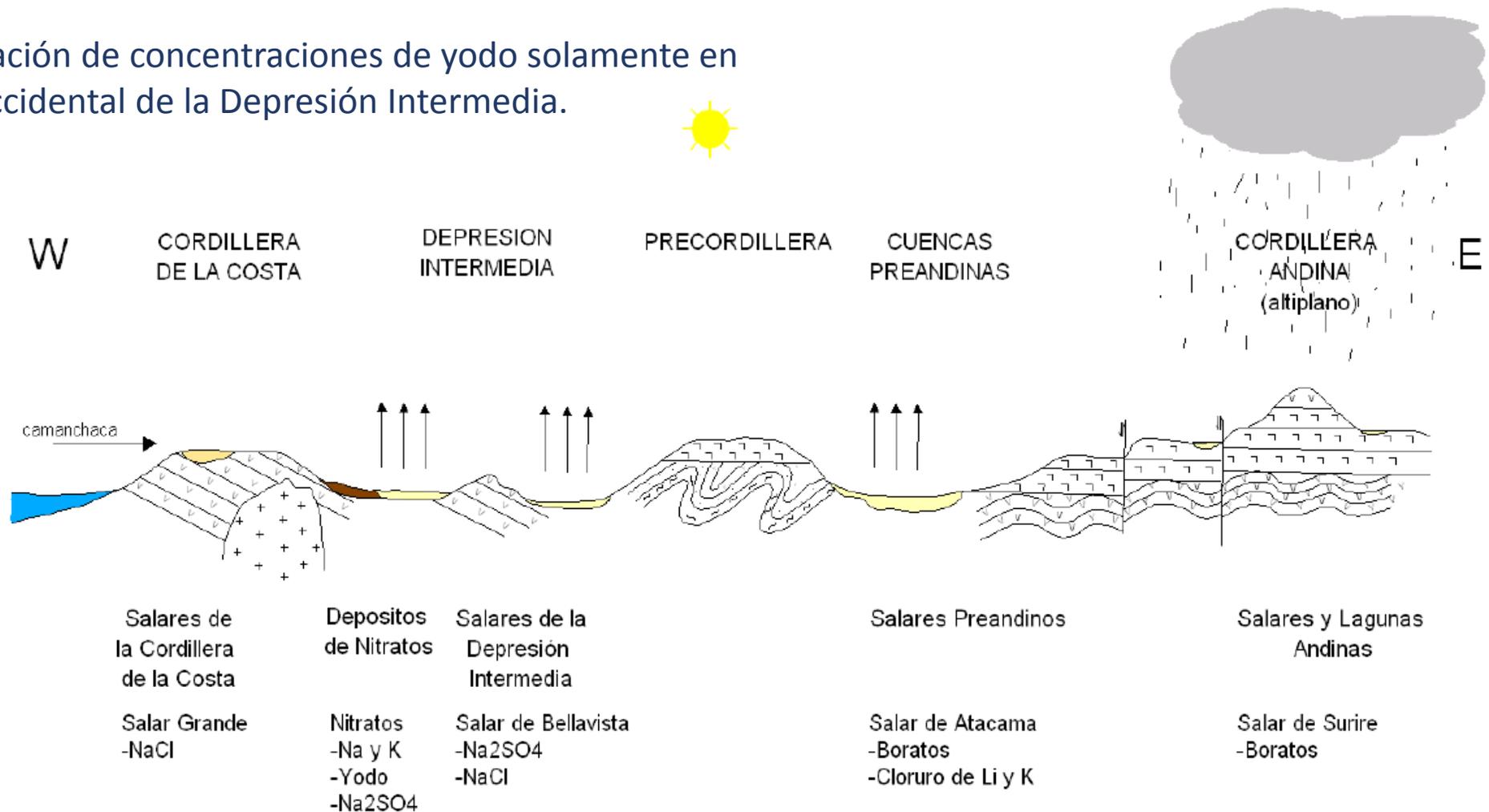
## Depósitos de Nitrato

- Se distribuyen en las Regiones de Tarapacá y Antofagasta, en una franja discontinua de 700 kms. y un ancho entre 30 y 50 km.
- En estos depósitos el yodo forma minerales de yodato, los que se presentan asociados a nitratos, cloruros, sulfatos en un mineral conocido como “Caliche”.



# Depósitos de Nitrato

- Sección esquemática que muestra la distribución de Depósitos de Nitratos y Salares en el Norte de Chile.
- Notar ubicación de concentraciones de yodo solamente en el flanco occidental de la Depresión Intermedia.



## Hipótesis sobre origen del yodo

- Nubes de ácidos nítricos de origen volcánico.
- Materiales depositados de la atmósfera.
- Decaimiento de algas y otra vegetación marina en aguas y zonas pantanosas en cuencas marinas de circulación restringida.
- Nitrificación y lixiviación de guano de aves.
- Spray Marino

Modelo de George Ericksen (1981,1993):

- Acumulación durante un largo tiempo de materiales salinos a partir de la atmósfera. Los componentes salinos deben haber sido transportados por y depositados desde la atmósfera principalmente. Las salitreras con leyes económicas se formaron acumulación de materiales salino y disueltos por aguas lluvias. La fuente principal de materiales salinos fueron: spray marino, volcanes, reacciones fotoquímicas de la atmósfera.



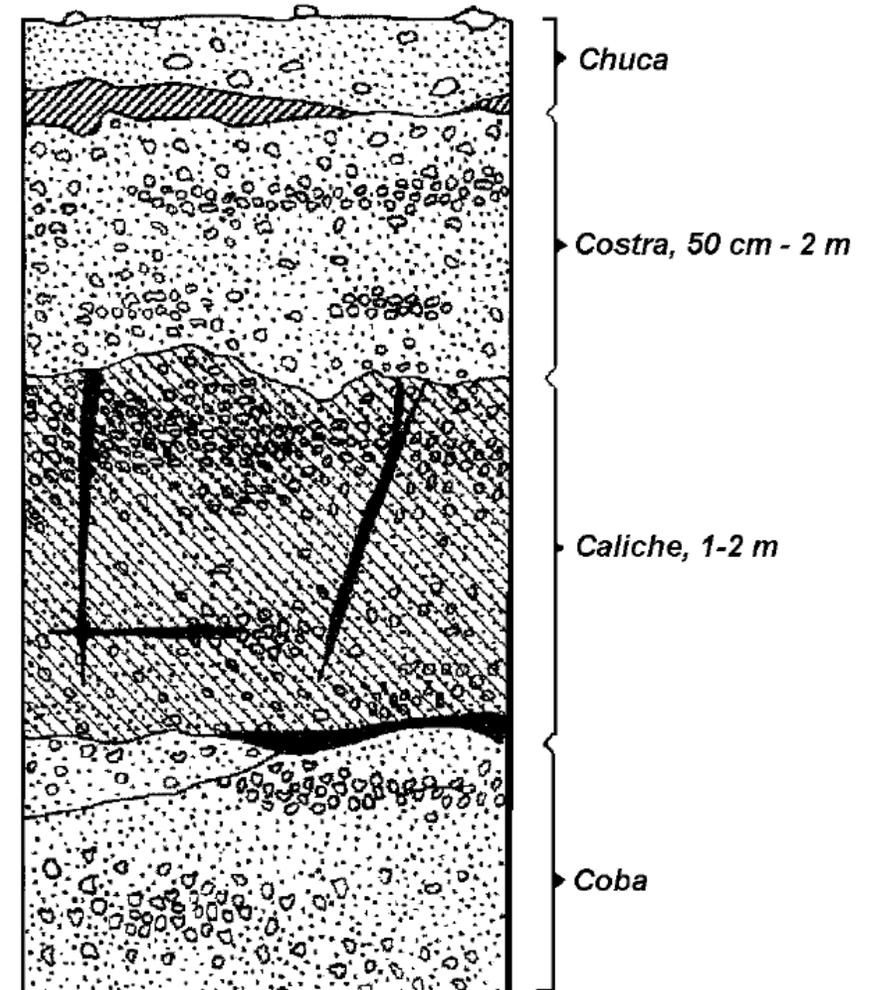
## Hipótesis sobre origen del yodo

- Investigadores del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, liderados por el Profesor Martin Reich, han realizado trabajos con el trazador isotópico yodo -129, el cual puede caracterizar la huella isotópica de los diferentes reservorios de yodo.
- Los datos adquiridos indican que las concentraciones anómalas de yodo serían el resultado de la mezcla entre fluidos salinos profundos -relacionados a formaciones marinas del Mesozoico en el área- y fluidos de origen meteórico o superficial.
- Esta hipótesis está siendo testeada, y los resultados hasta el momento indican que, contrario a lo que se especulaba, el yodo en Atacama no está relacionado con la atmósfera

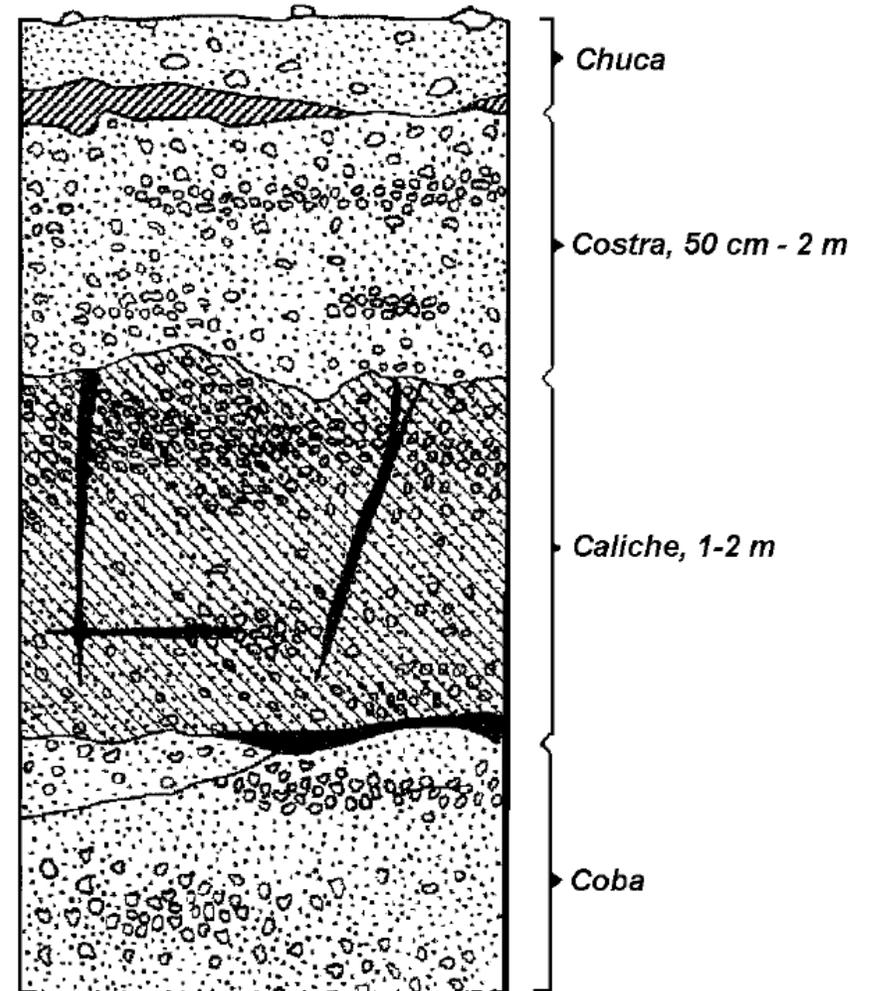
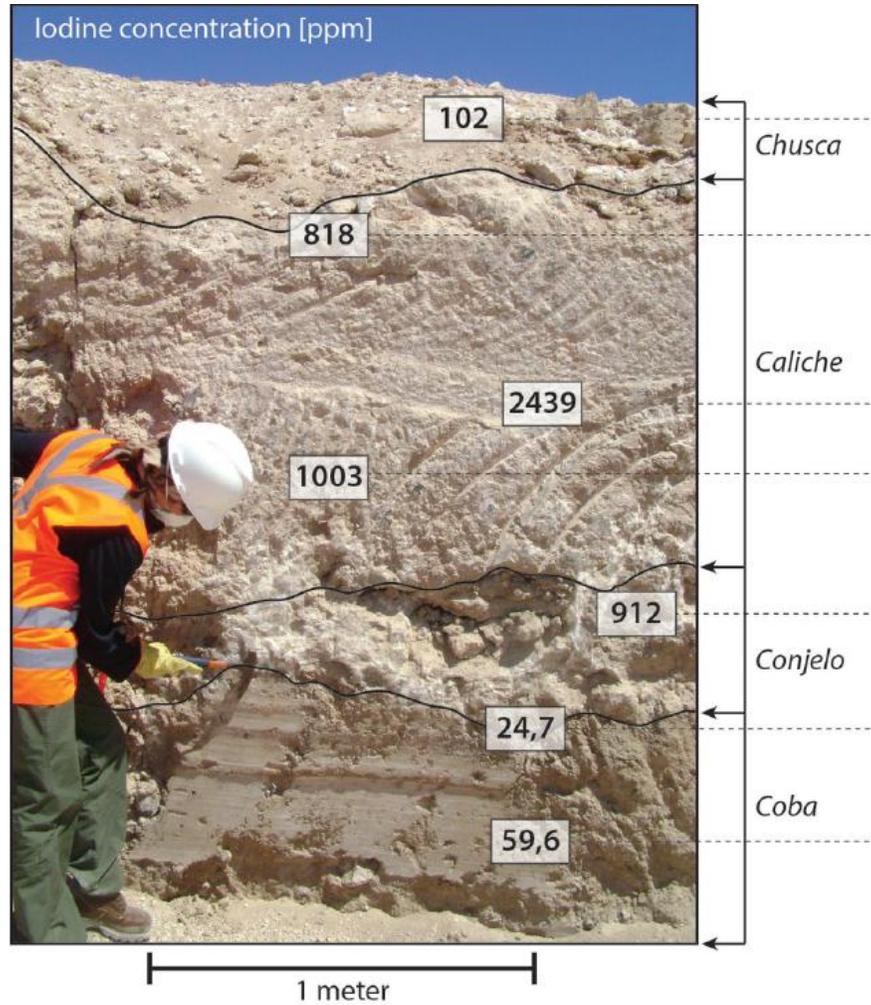


## Columna tipo yacimientos aluviales

- Consiste en 4 niveles de acuerdo a su contenido mineral y su grado de cementación
- Chuca o Chusca: Material fino, arcillas, limos, arenas y sales, principalmente anhidrita, yeso y otros sulfatos.
- Costra: Compuesto por relleno aluvial, gravas y arenas cementado por sales pero con bajos contenidos de nitratos o yodatos.
- Caliche: Muy similar a la costra pero con leyes de nitrato y yodo explotables
- Coba: Base de la columna y está compuesta por material detrítico como gravas, arenas y limos no cementados



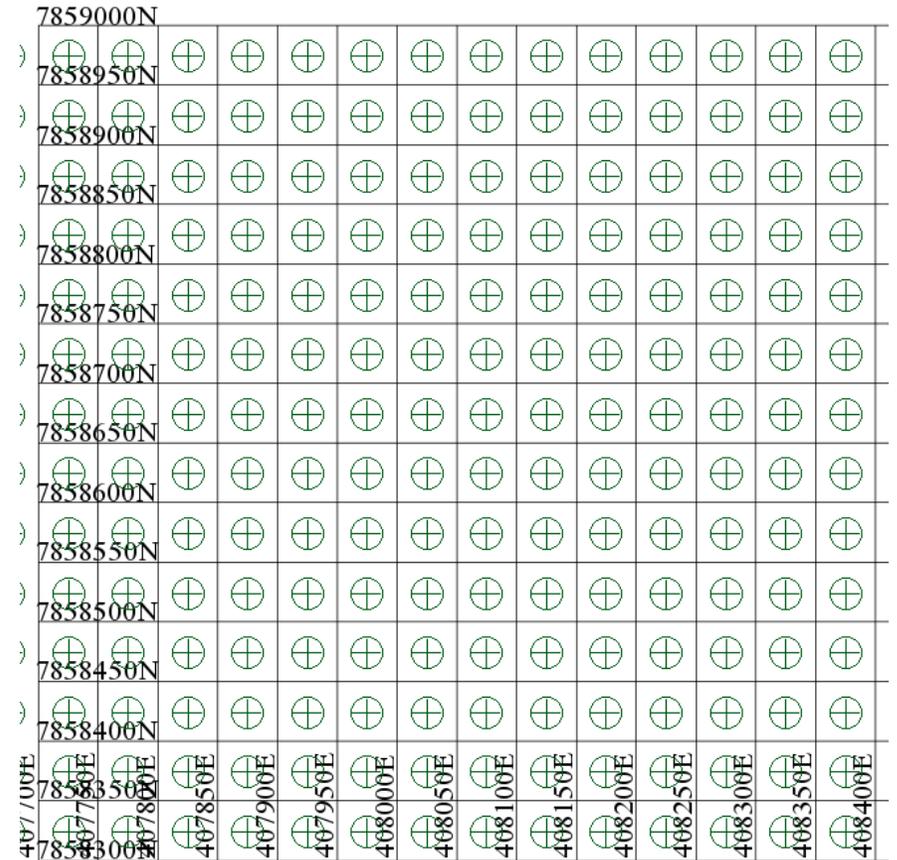
# Columna tipo yacimientos aluviales



# **Estimación de Recursos y Reservas**

# Exploración

- La exploración en su mayoría utiliza sondajes de aire reverso.
- Dependiendo de la etapa del proyecto las mallas pueden variar desde 1000x1000 metros en etapas iniciales, hasta mallas de 50x50 metros.
- Son sondajes con profundidades desde 4 metros hasta máximo 12 metros.
- Las mallas son regulares y los sondajes verticales.



## Experimento en terreno para comprobar la existencia de Yodo

Necesitamos: Yoduro de Potasio, Ácido Sulfúrico al 10%, Agua, Probeta, Almidón.

- Se toma la muestra de caliche en terreno, se rompe la muestra y se elige un pedazo “interno” (no la parte de la muestra que estaba en contacto con la intemperie) y se muele bien.
- Se coloca un poco de agua en una probeta y se acidifica con ácido sulfúrico al 10%.
- Se coloca un poco de la muestra molida en la probeta que tiene el agua acidificada.



## Experimento en terreno para comprobar la existencia de Yodo

- Al agregar yoduro de potasio la solución toma un color entre anaranjado y violeta dependiendo de la cantidad de yodato presente en la muestra de caliche.
- La reacción que ocurre es la siguiente: en medio ácido el reactivo yoduro de potasio reacciona con el yodato  $\text{IO}_3$  del caliche formando  $\text{I}_2$  (yodo libre). Cuando las muestras de caliche tienen mucho yodo, la solución se pone violeta sin necesidad de agregar almidón.
- Si el color es anaranjado claro, se puede agregar almidón a la probeta para confirmar la presencia de yodo. El almidón toma una coloración entre azulada y violeta al capturar el yodo libre.
- Se puede generar una escala de colores y asociar cada color a una ley del caliche (para esto hay que hacer otro análisis riguroso en un laboratorio que indique exactamente la ley del caliche y genere la escala de colores).

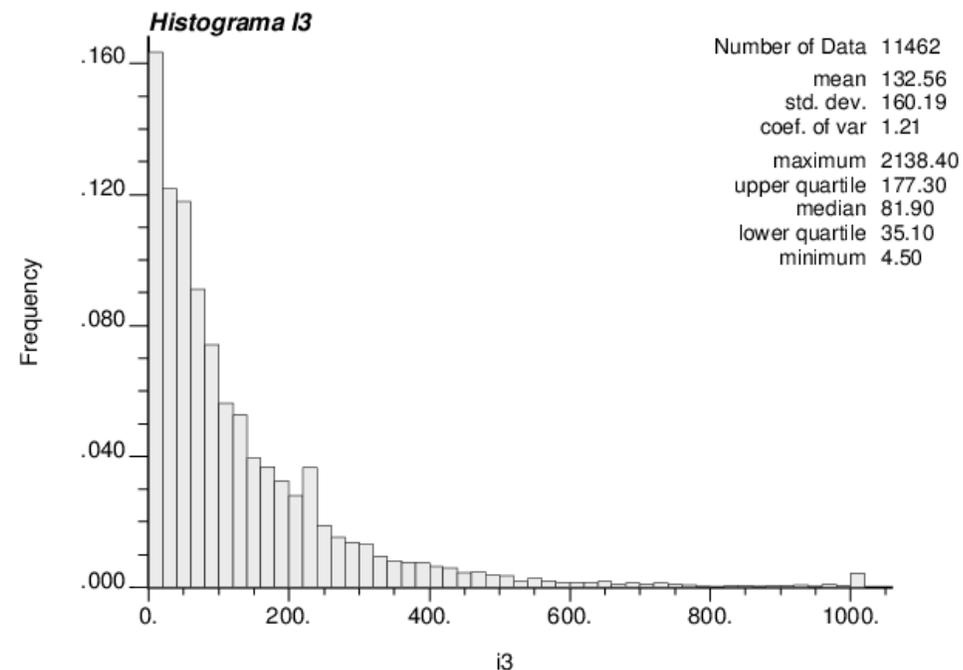
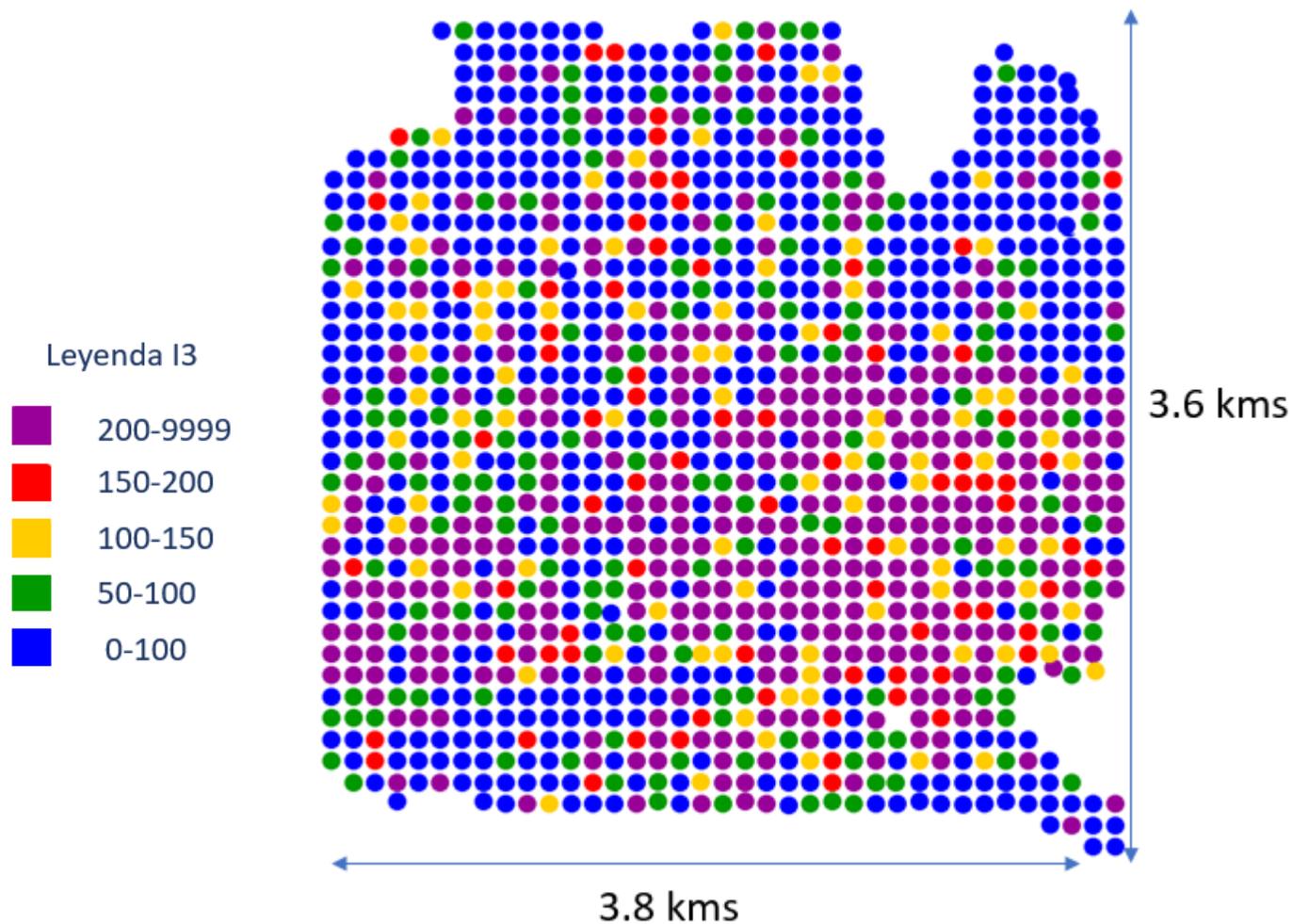
300 ppm yodo



700 ppm yodo

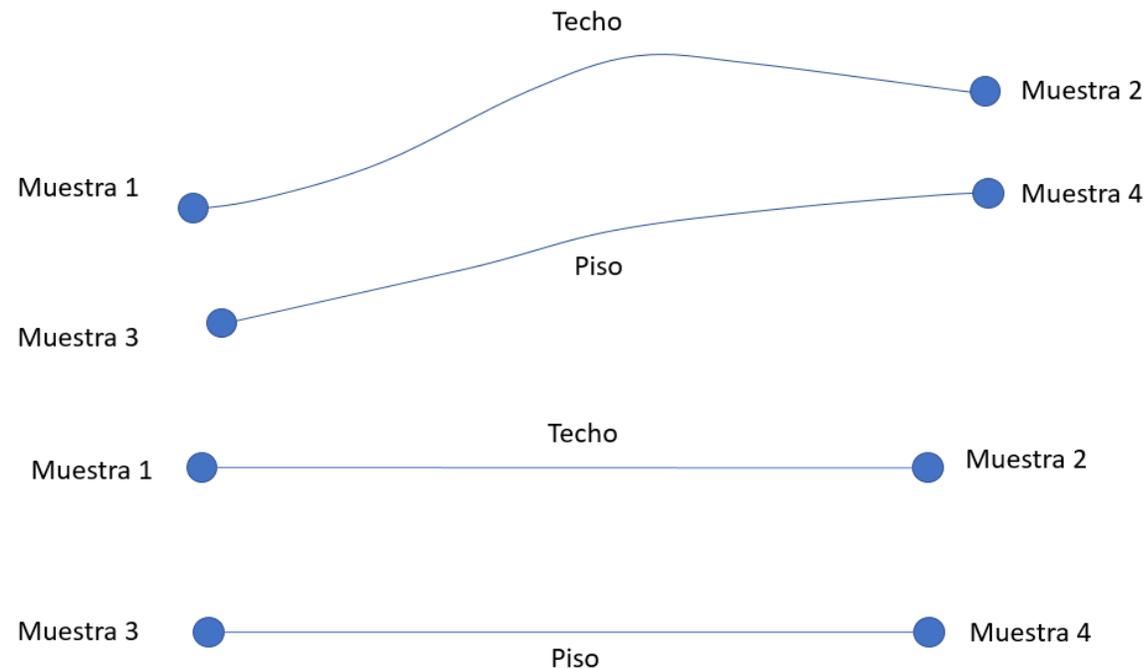
# Ejercicio estimación de recursos

- Malla de 100 metros x 100 metros, profundidad 6 metros.
- Compósitos cada 0.5 metros



# Unfolding

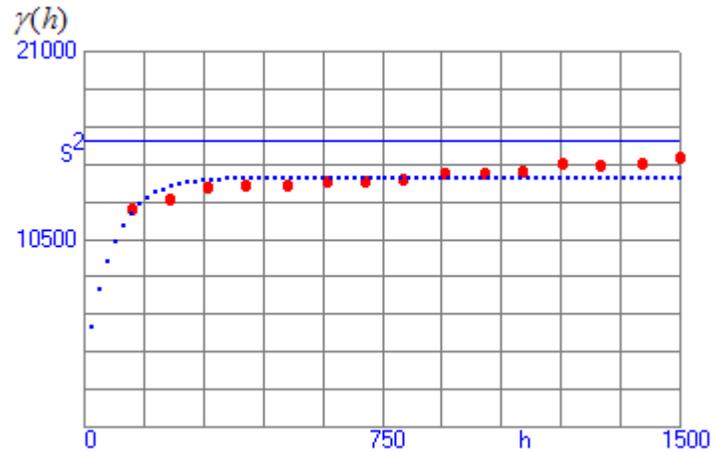
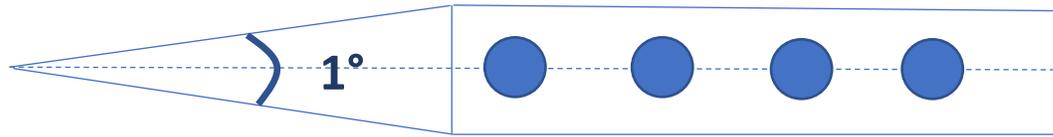
- En las formaciones tipo manto es necesario realizar una operación llamada “Unfolding”.
- El Unfolding es una herramienta que busca llevar una formación de minerales a su estado inicial de depositación.
- Se trasladan a la misma cota todos los collares de los sondajes, con el objetivo de estudiar y estimar la variable yodo siguiendo el manto.
- Se realiza variografía y estimación de recursos en el plano horizontal, y posteriormente se vuelve a su cota de origen.
- Al ser solo un cambio de cotas es un procedimiento simple de realizar que no necesita softwares complejos como en otros casos de uso de unfolding.



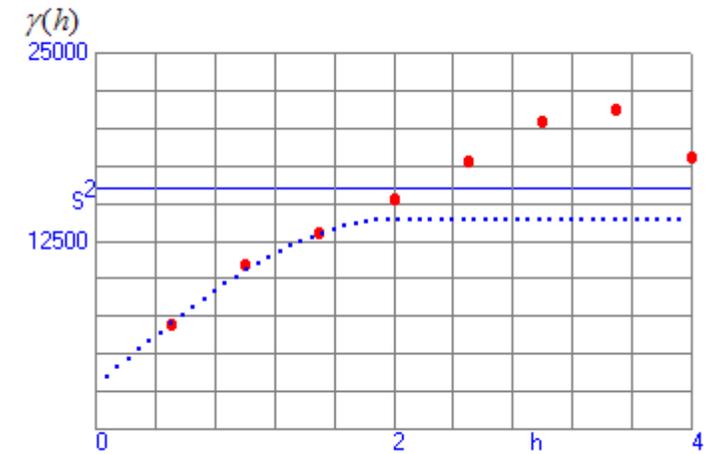
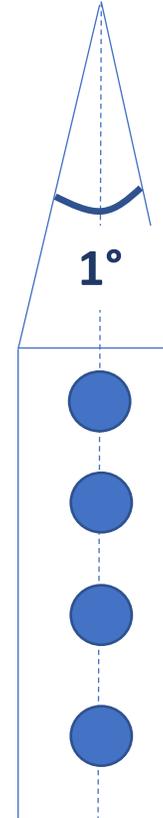
# Variografía

- Tolerancia Angular 1°

Alcance Variograma omnihorizontal = 210 metros

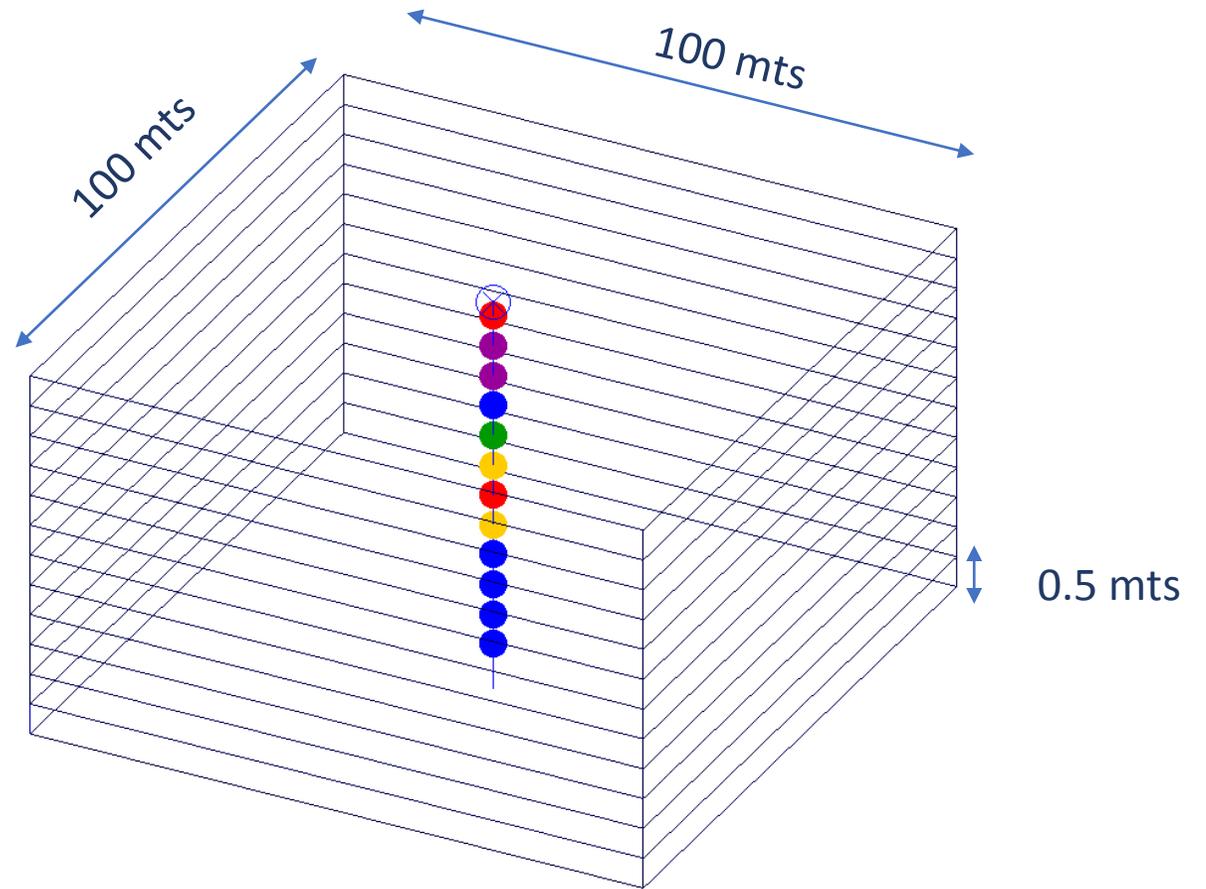
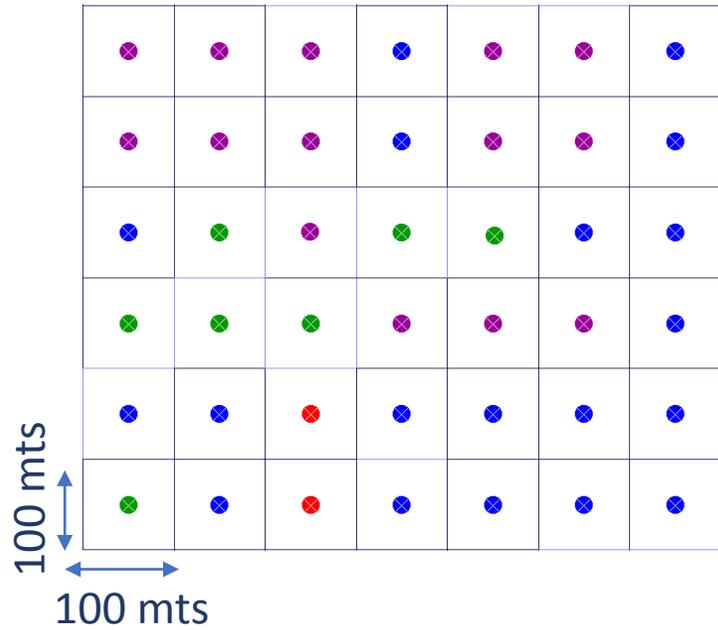


Alcance Variograma vertical = 2 metros



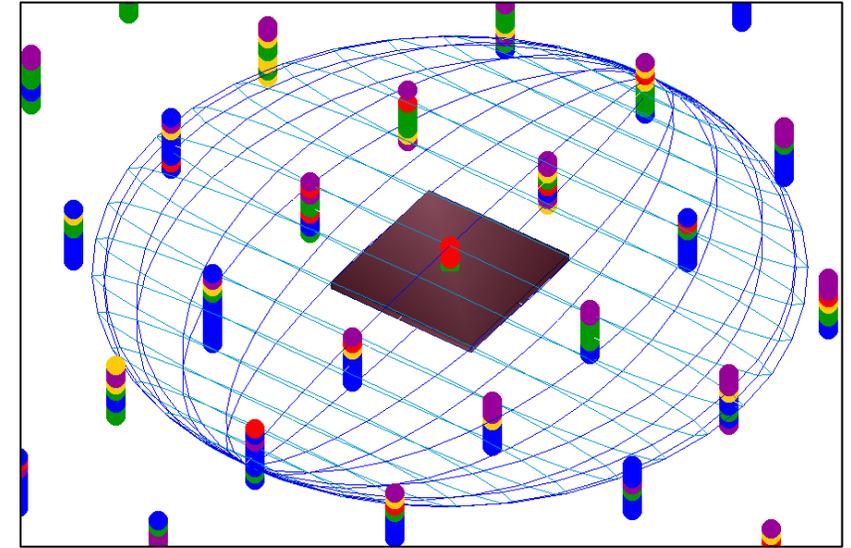
# Modelo de Bloques

- Definimos el tamaño del bloque de acuerdo a la grilla. En este caso de 100x100x0.5. El bloque se ubica de tal forma que el centroide este en la misma ubicación al compuesto.



# Estimación de Recursos

- Krigeado Ordinario
- Elipsoide de búsqueda 210 metros horizontal, 2 metros vertical .
- Se recomienda no limitar el número de datos para disminuir el suavizamiento. Esta práctica aumentará los errores de estimación y el sesgo condicional.
- No usar varias pasadas ya que se producirán discontinuidades artificiales en el modelo de bloques.
- Si se requiere mayor precisión en la estimación se debe aumentar la cantidad de información.



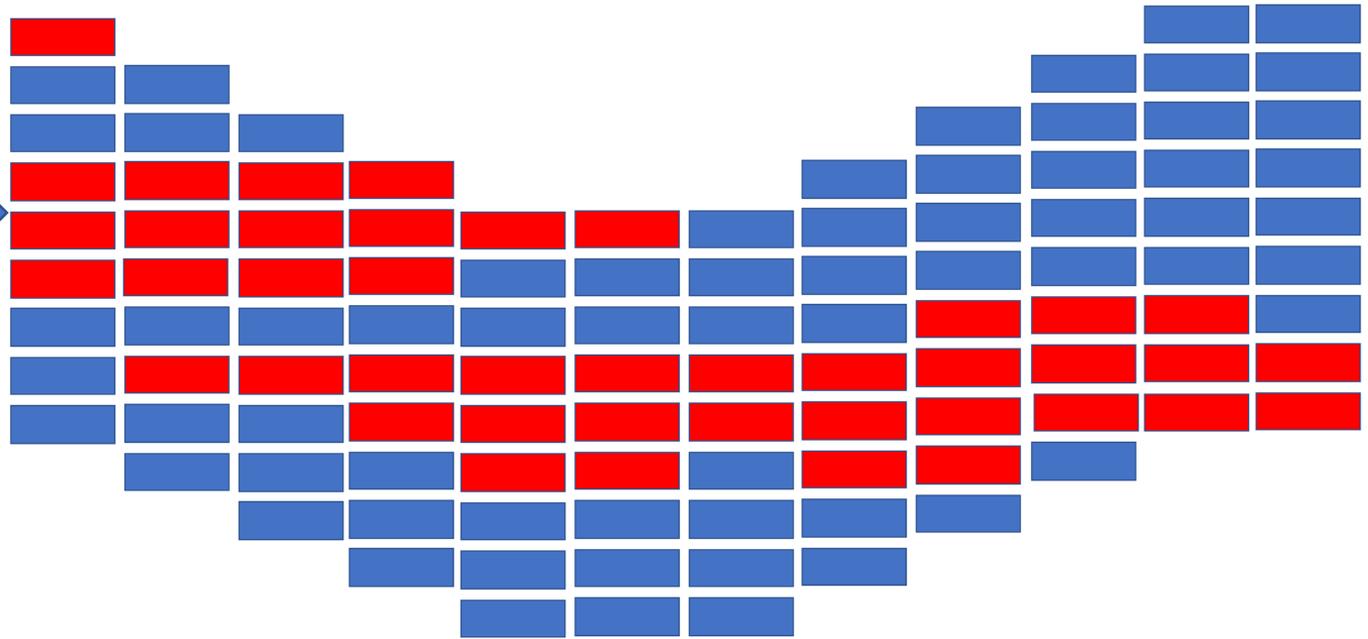
Leyes de Bloques

Leyes de Compósitos

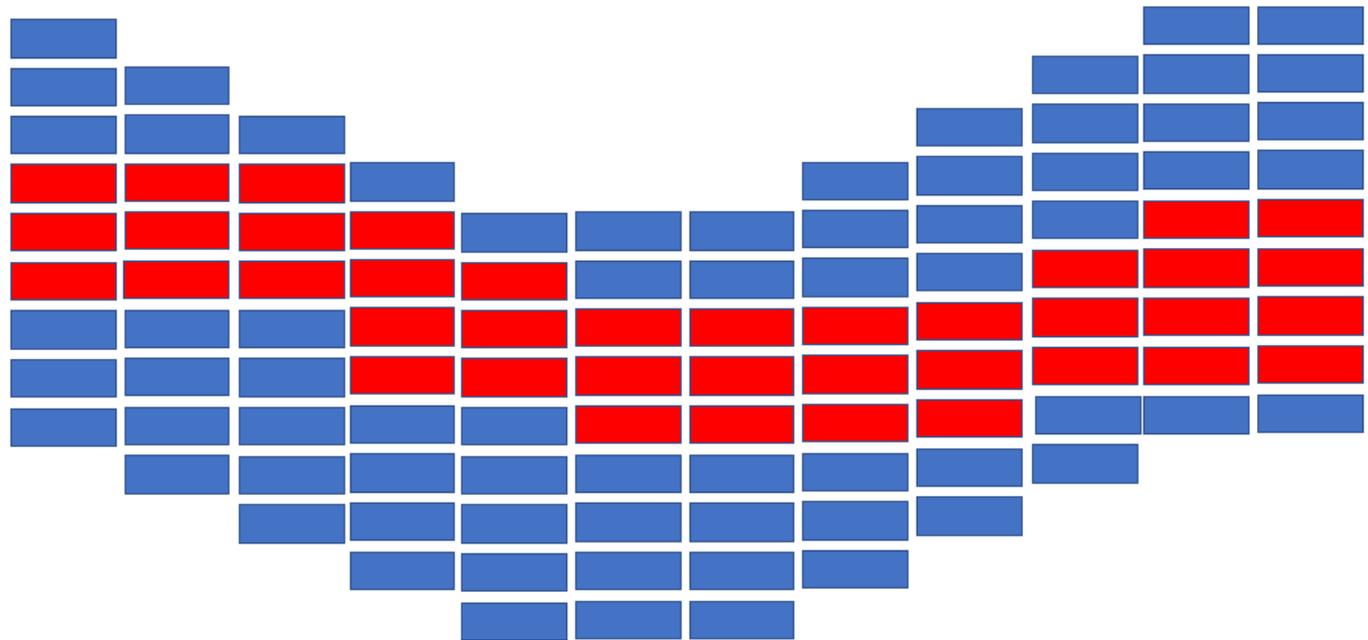
116.4	+106.2
257.9	+262.8
338.0	+505.8
238.5	+225.9
127.0	+69.3
73.0	+40.5
47.8	+24.3
39.2	+19.8
41.1	+14.4

# Unfolding

Estimación sin "Unfolding"

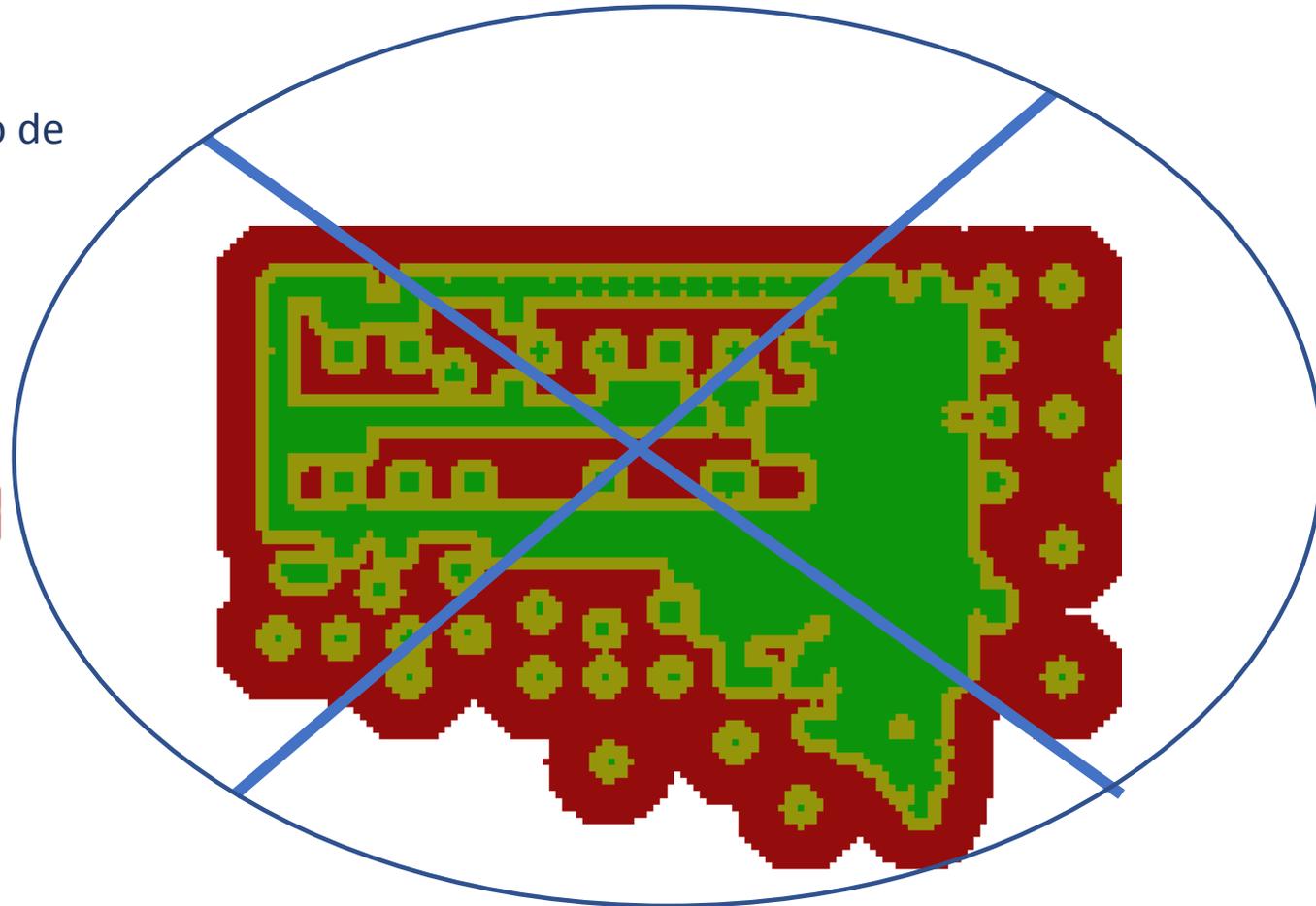
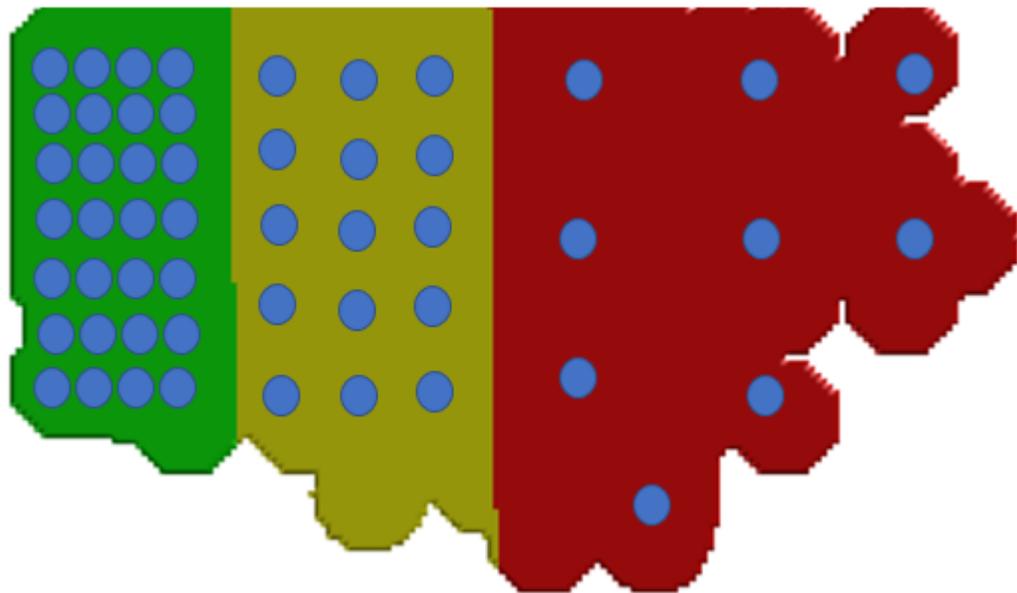


Estimación con "Unfolding"



## Parámetros de Clasificación de Recursos

-  Recursos Medidos = Malla de 50x50 metros o menos.
-  Recursos Indicados = Malla de 100x100 metros o menos.
-  Recursos Inferidos = Máximo malla de 250 x 250 metros dependiendo de la continuidad del cuerpo.
- El “spotted dog” es mas fácil evitar en este tipo de depósitos

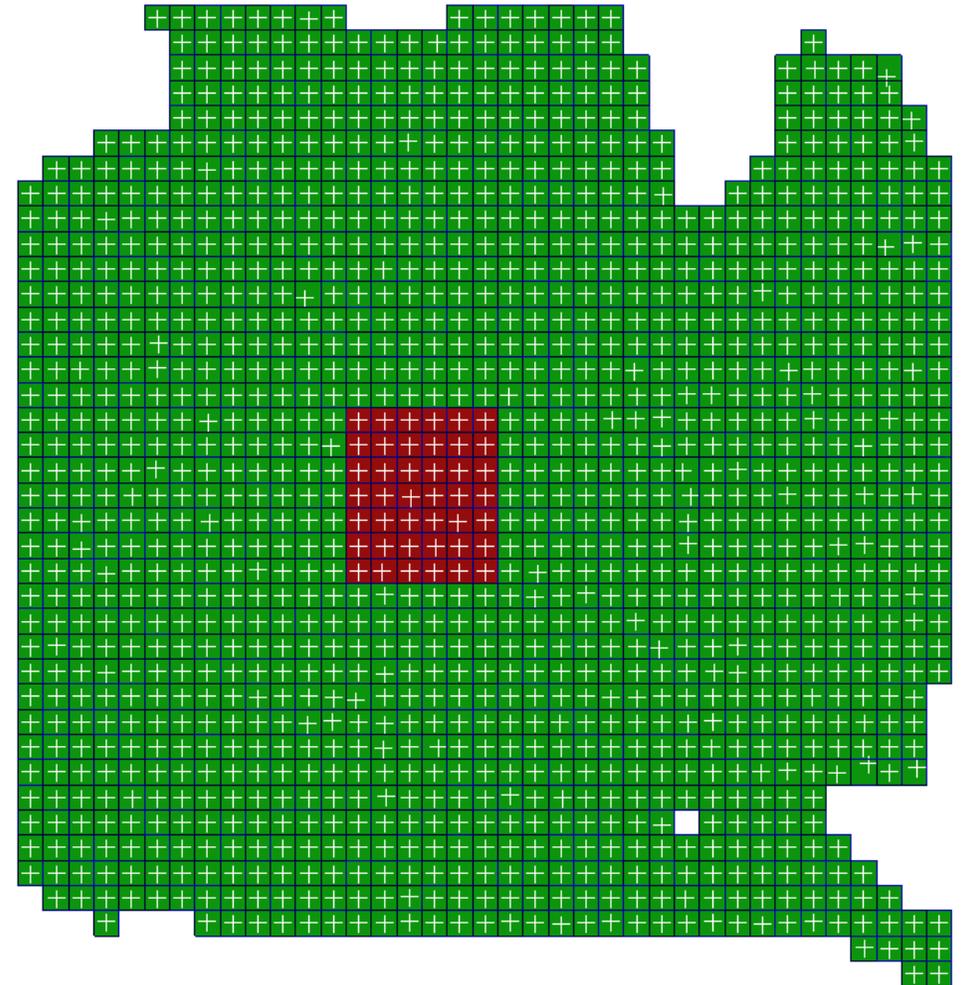


## Parámetros de Clasificación de Recursos

- Cálculo varianza de estimación para un período trimestral y anual de acuerdo a la formula

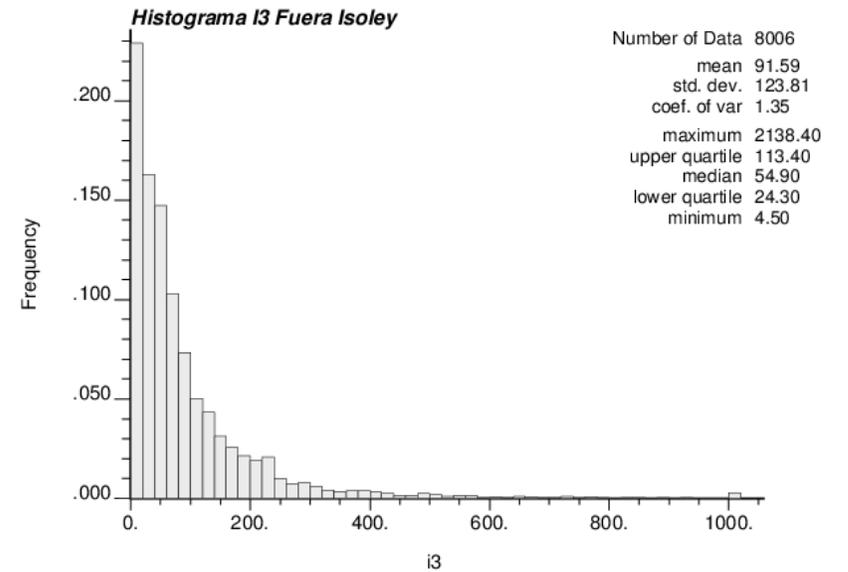
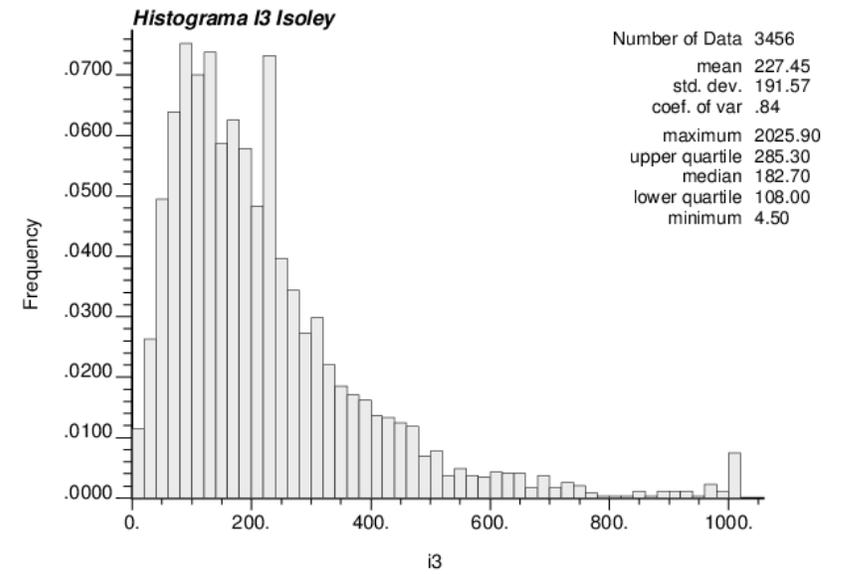
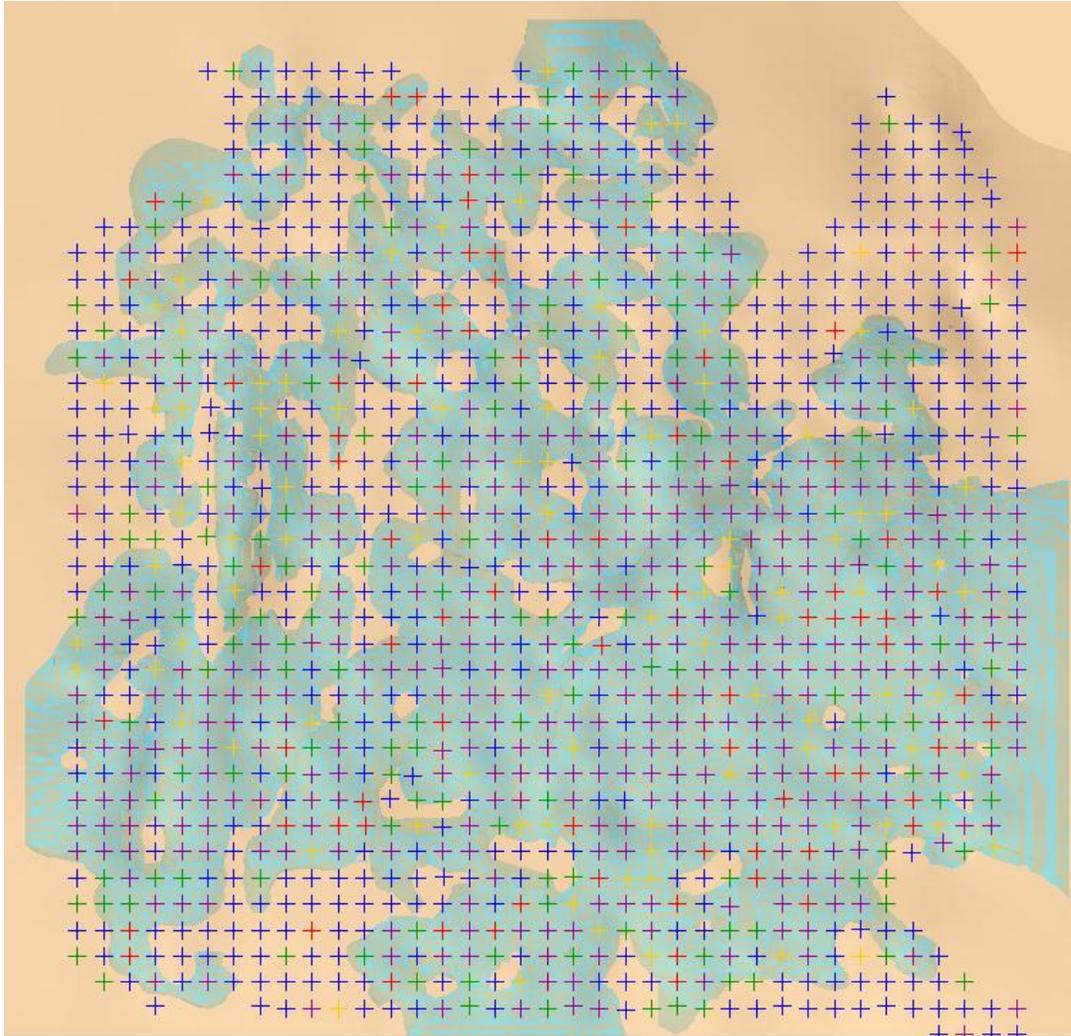
$$\sigma_E^2 = 2 \sum_{i=1}^N \alpha_i \frac{1}{V} \int_V \gamma(x_i, x) dx - \frac{1}{V^2} \int_V \int_V \gamma(x, y) dx dy - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \alpha_i \alpha_j \gamma(x_i, x_j)$$

- Cálculo del error para un período trimestral y anual
- Recursos medidos, valor real se encuentra en el intervalo +15%, un 90% del tiempo en un volumen de producción trimestral. Recursos Indicados, valor real se encuentra en el intervalo +15%, un 90% del tiempo volumen de producción anual.
- Producción anual = 3.8 mt, Producción trimestral = 0.95 mt
- Error anual 13% , trimestral 19% un 90% del tiempo.
- Podemos argumentar que la malla de 100 x 100 metros permite categorizar recursos como Indicados en este caso.



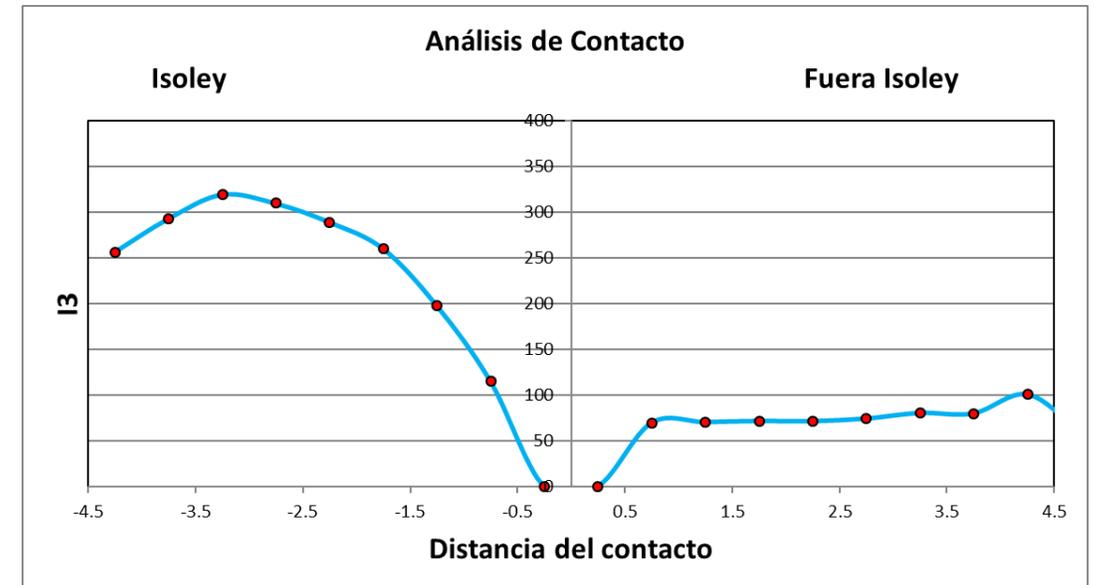
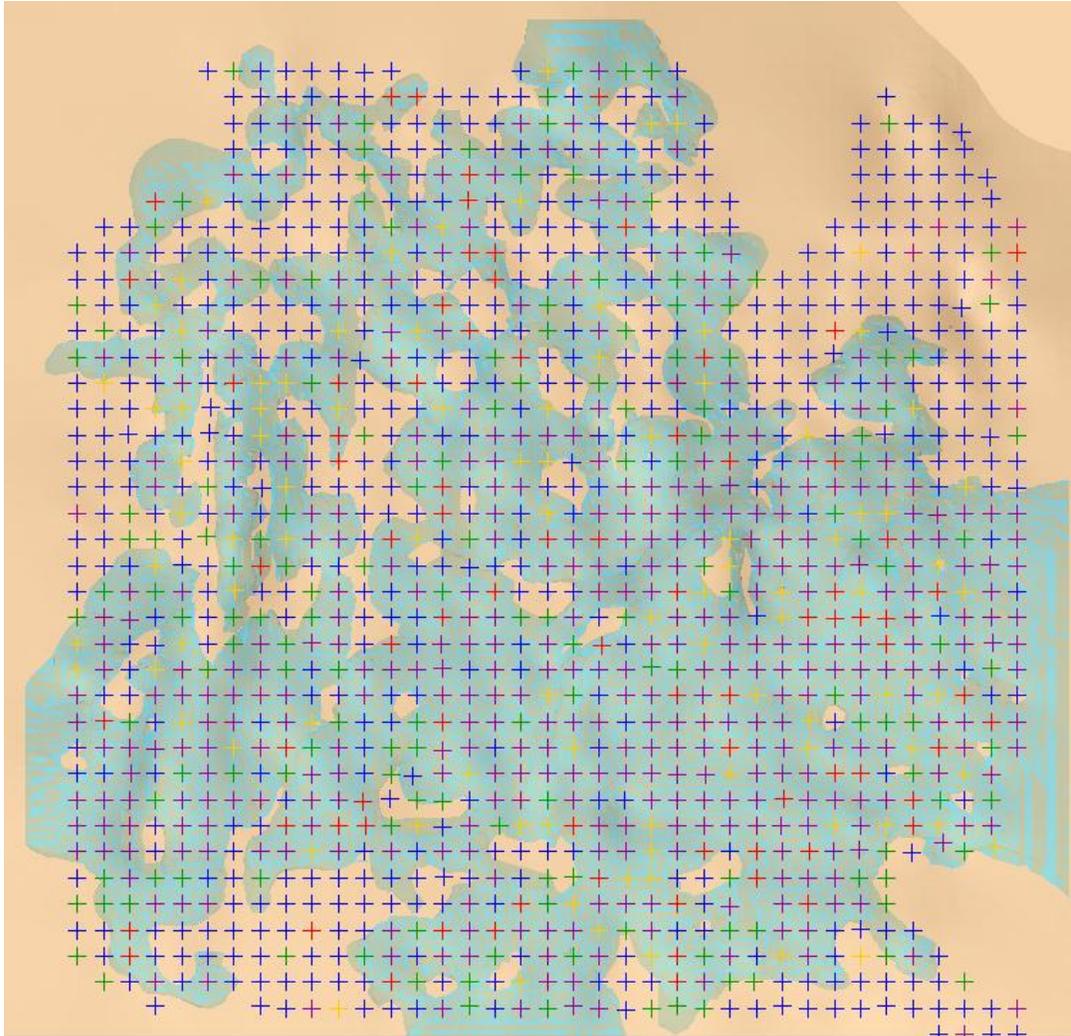
# Otra forma de estimación

- Crear una Isoley de Yodo que separe las zonas de alta con las de baja ley



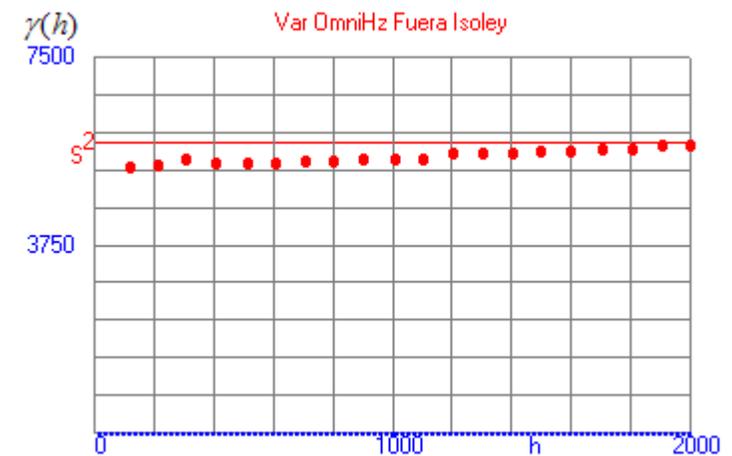
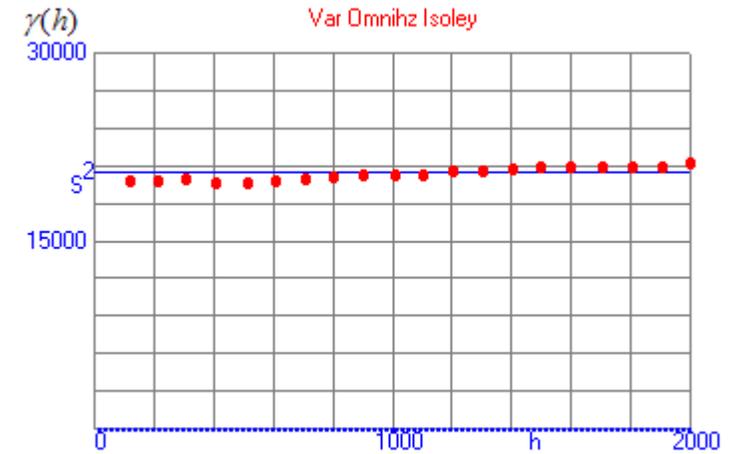
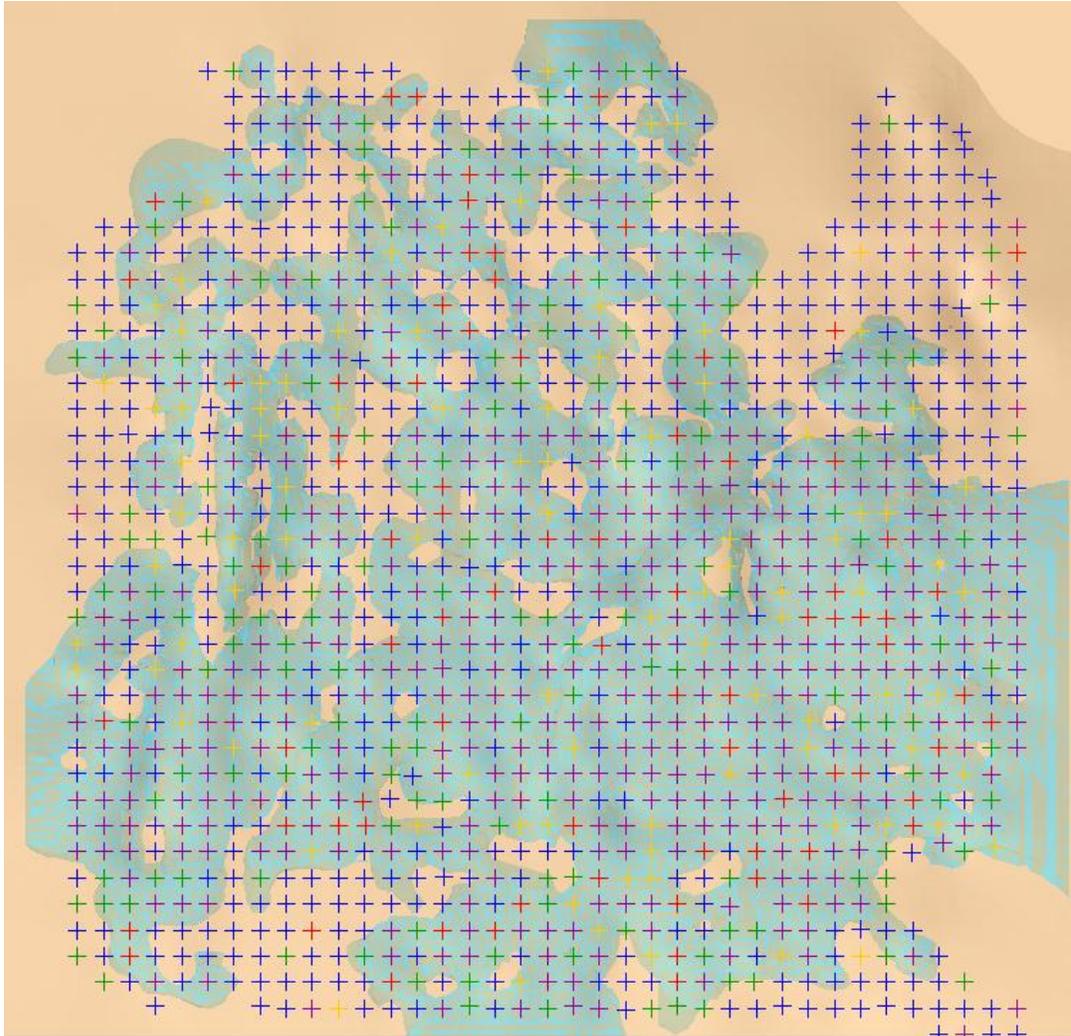
# Otra forma de estimación

- Crear una Isoley de Yodo que separe las zonas de alta con las de baja ley

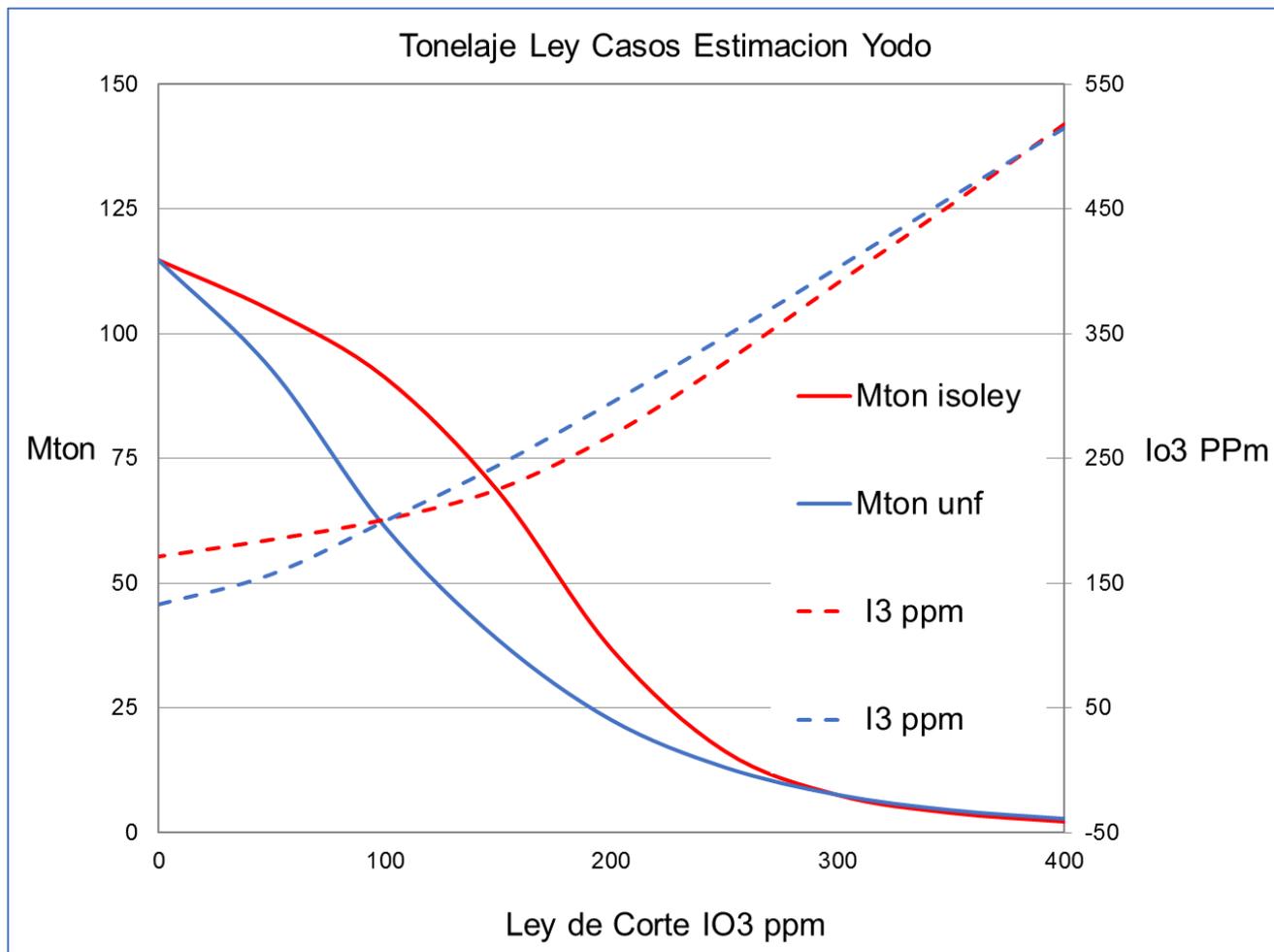


# Otra forma de estimación

- Crear una Isoley de Yodo que separe las zonas de alta con las de baja ley



## Comparación ambas estimaciones



Caso Unfolding			
Ley Corte	Mton	Ley I3 (g/t)	Ton Yodo
400	3	515	1,375
350	4	459	2,017
300	7	403	3,002
250	13	348	4,512
200	22	295	6,620
150	39	244	9,419
100	61	200	12,221
50	93	157	14,570
0	115	133	15,236

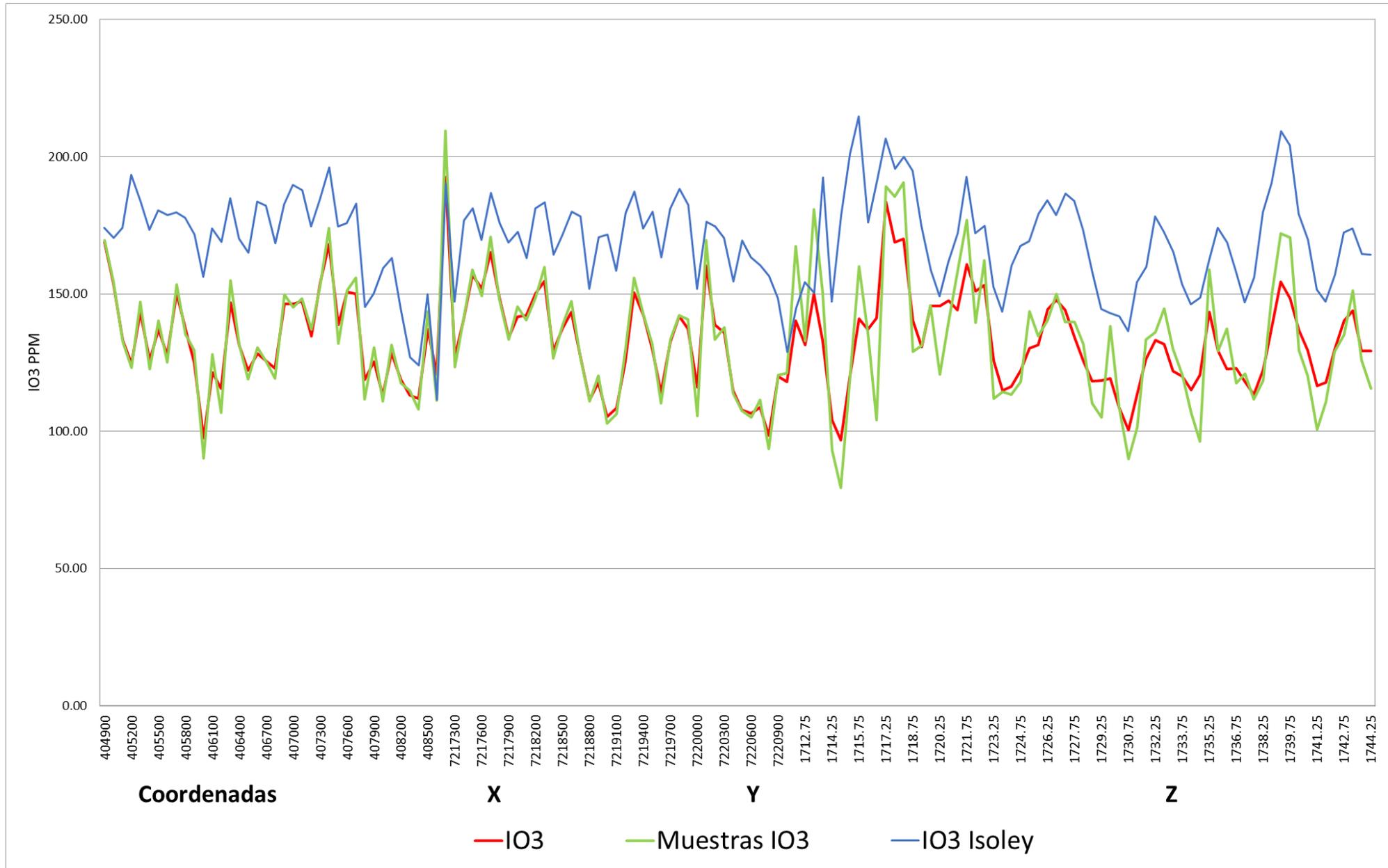
Caso Isoley			
Ley Corte	Mton	Ley I3 (g/t)	Ton Yodo
400	2	518	1,135
350	4	453	1,786
300	8	391	2,938
250	16	327	5,333
200	37	268	9,872
150	68	225	15,401
100	91	201	18,318
50	105	185	19,323
0	115	171	19,630

\* Ley Media compósitos de I3 = 133

\* Sobrestimación finos ley de corte 0 = 29%

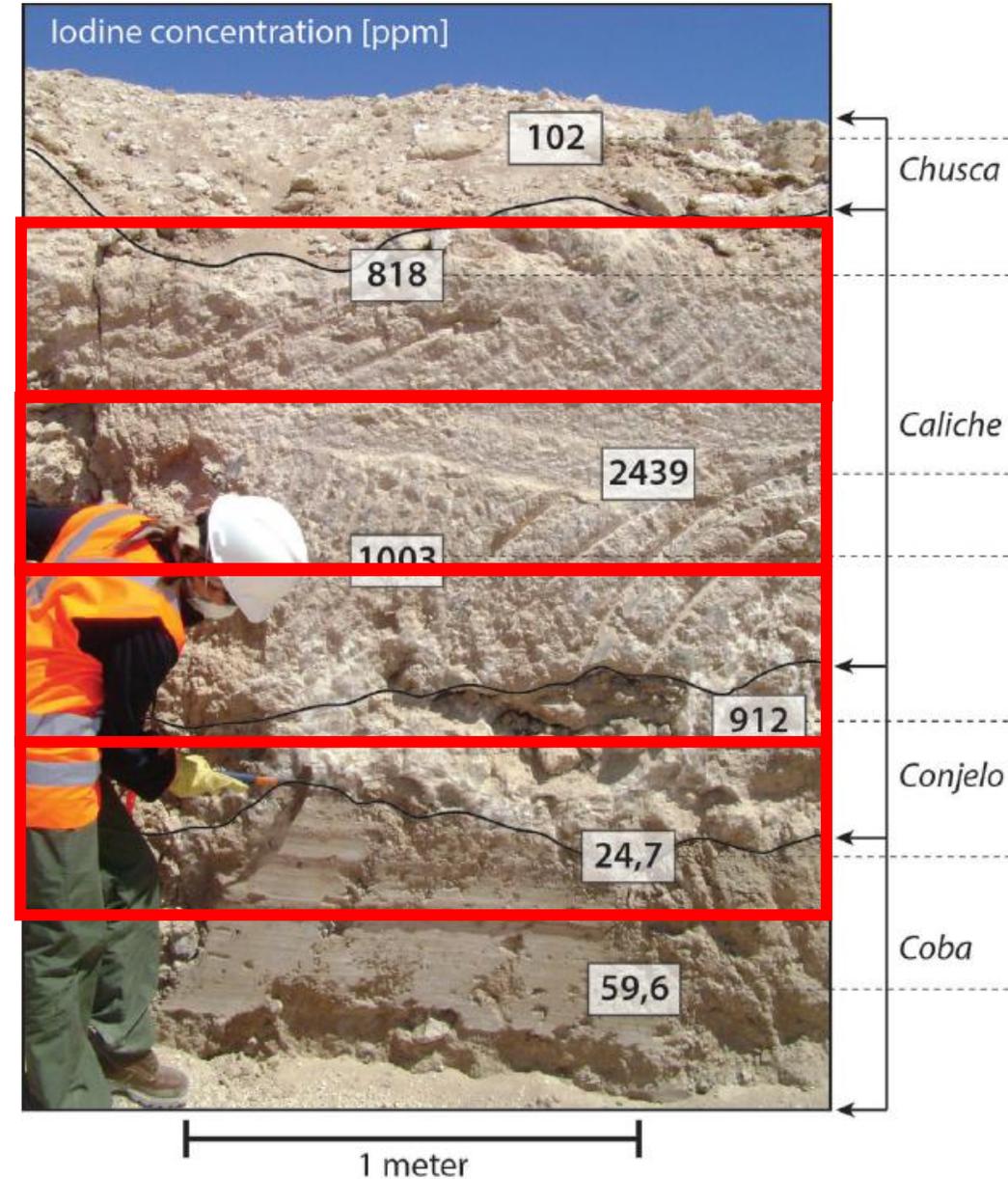
\* Sobrestimación finos ley de corte 250 = 18%

# Derivas, Ley estimada por unfolding, isoley y muestras



## Problemas Isoley y fronteras duras

- La frontera dura asume que no hay contaminación entre las unidades.
- Que isoley usar ?? Yo use 100 ppm ¿Por qué no usar 150 ppm ? ¿ 70 ppm ? ¿ 200 ppm ?. El corte no es natural, no tiene un fundamento geológico ni geoestadístico.
- ¿ Hay independencia de las leyes entre las unidades ?
- Conocimiento sin error del límite entre ambas unidades.
- El uso de isoleyes produce un sesgo que conduce a una sobreestimación del depósito de yodo.



## Cálculo de reservas

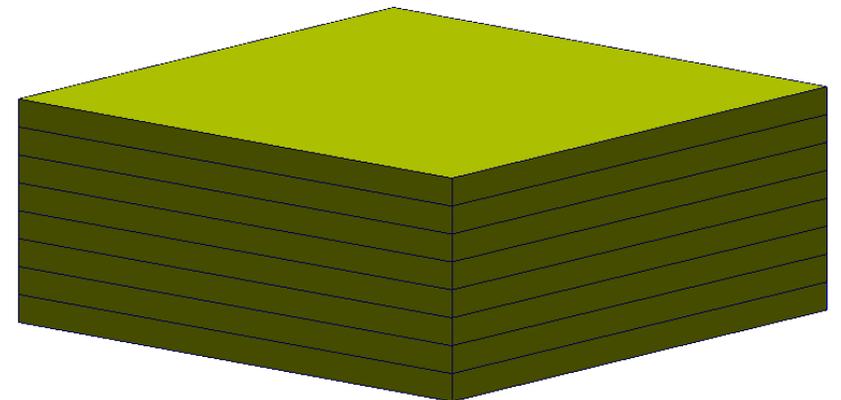
- Para definir las reservas, hay que determinar la ley de corte de acuerdo a la recuperación, costos, y suposiciones de precio.
- Una vez determinada la ley de corte se calcula la columna mineralizada que garantice el máximo de yodo fino sobre la ley de corte.
- La secuencia de explotación se realiza de acuerdo a los criterios estratégicos definidos por la empresa.
- El tema geomecánico no es de importancia en este tipo de depósitos debido a la baja altura de sus bancos.
- Se calcula la potencia de cada columna de bloques.



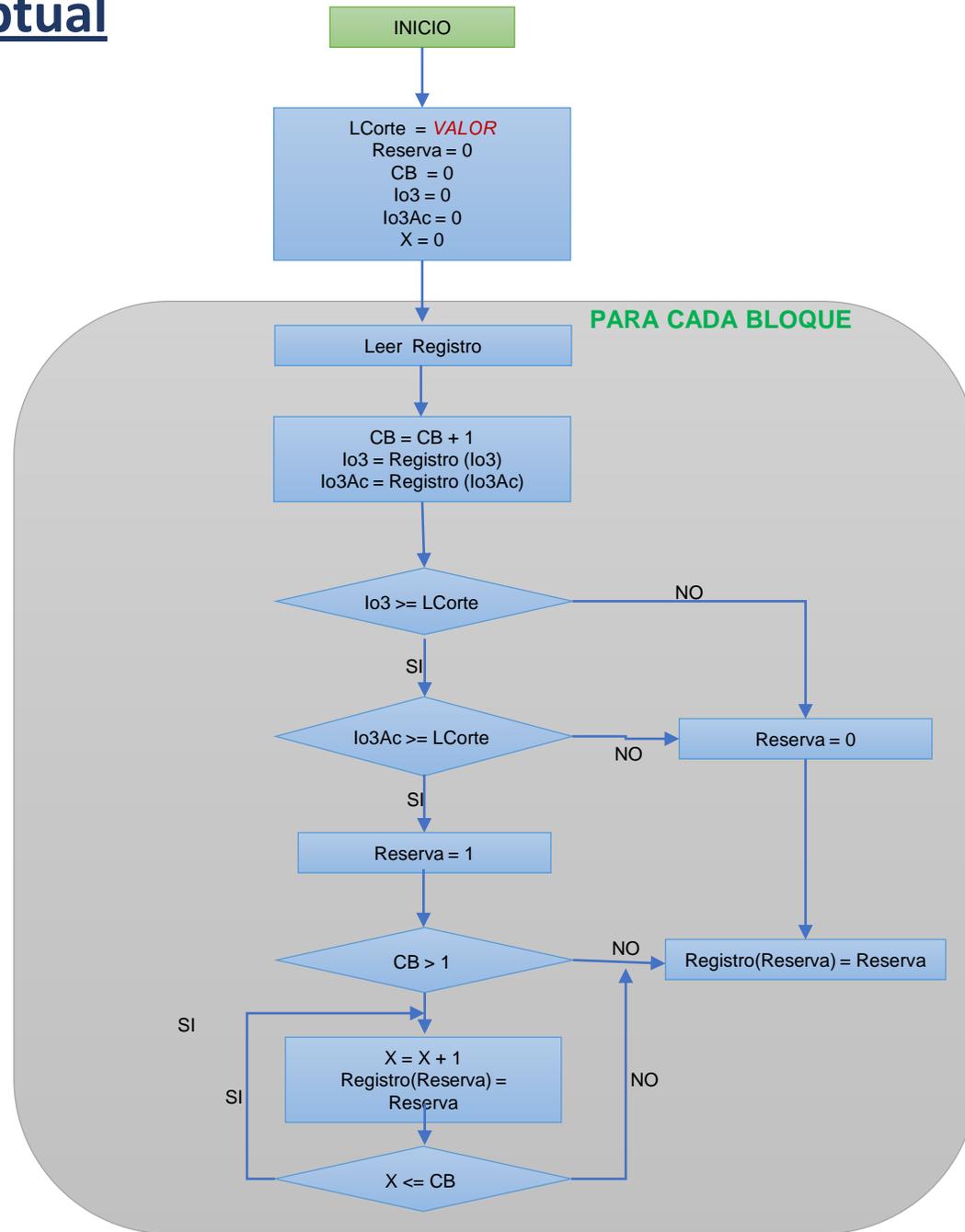
## Cálculo de reservas

- El objetivo es determinar la potencia de cada columna de bloques.
- Asignamos un mismo número a cada columna
- Calculamos la ley de yodo acumulado.
- Si está sobre la ley de corte es reserva.
- Se busca maximizar la ley de yodo por lo que si el acumulado esta sobre la ley de corte, pero no así la ley del bloque.

1	2	3
4	5	6
7	8	9



# Diagrama de flujo conceptual



## Cálculo de reservas

- El objetivo es determinar la potencia de cada columna de bloques.
- Asignamos un mismo número a cada columna
- Calculamos la ley de yodo acumulado.
- Si está sobre la ley de corte es reserva.
- Se busca maximizar la ley de yodo por lo que si el acumulado esta sobre la ley de corte, pero no así la ley del bloque.

IO3 ppm	IO3 Acumulado ppm	Reserva
50	50	
500	275	
150	233	
150	213	
50	180	

## Cálculo de reservas

- El objetivo es determinar la potencia de cada columna de bloques.
- Asignamos un mismo número a cada columna
- Calculamos la ley de yodo acumulado.
- Si está sobre la ley de corte es reserva.
- Se busca maximizar la ley de yodo por lo que si el acumulado esta sobre la ley de corte, pero no así la ley del bloque.

IO3 ppm	IO3 Acumulado ppm	Reserva
50	50	
500	275	
220	257	
150	230	
50	194	

## Cálculo de reservas

- El objetivo es determinar la potencia de cada columna de bloques.
- Asignamos un mismo número a cada columna
- Calculamos la ley de yodo acumulado.
- Si está sobre la ley de corte es reserva.
- Se busca maximizar la ley de yodo por lo que si el acumulado esta sobre la ley de corte, pero no así la ley del bloque.

IO3 ppm	IO3 Acumulado ppm	Reserva
50	50	
500	275	
250	267	
150	238	
50	200	

## Cálculo de reservas

- Se genera una rutina donde los input son el n° de columna y las coordenadas del centroide del bloque X,Y,Z
- Output es el io3 acumulado y el número 1 si es reserva y 0 si no es reserva.
- Posteriormente se puede importar al modelo de bloques el atributo reserva para realizar la planificación minera.
- También se puede calcular fácilmente la potencia de reserva de la columna

## RUN

N° Columna	X	Y	Z	i3	i3 acum	RESERVA
248	406800	7218400	1744.25	265		
248	406800	7218400	1743.75	342		
248	406800	7218400	1743.25	272		
248	406800	7218400	1742.75	144		
248	406800	7218400	1742.25	61		
248	406800	7218400	1741.75	31		
248	406800	7218400	1741.25	56		
248	406800	7218400	1740.75	75		
248	406800	7218400	1740.25	83		
248	406800	7218400	1739.75	66		
248	406800	7218400	1739.25	48		
248	406800	7218400	1738.75	53		
250	406800	7218800	1756.75	140		
250	406800	7218800	1756.25	142		
250	406800	7218800	1755.75	150		
250	406800	7218800	1755.25	115		
250	406800	7218800	1754.75	69		
250	406800	7218800	1754.25	42		
250	406800	7218800	1753.75	24		
250	406800	7218800	1753.25	15		
250	406800	7218800	1752.75	19		
250	406800	7218800	1752.25	21		
250	406800	7218800	1751.75	21		
250	406800	7218800	1751.25	18		
252	406800	7219200	1765.25	162		
252	406800	7219200	1764.75	218		
252	406800	7219200	1764.25	178		
252	406800	7219200	1763.75	89		
252	406800	7219200	1763.25	29		
252	406800	7219200	1762.75	14		
252	406800	7219200	1762.25	15		
252	406800	7219200	1761.75	18		
252	406800	7219200	1761.25	20		
252	406800	7219200	1760.75	21		
252	406800	7219200	1760.25	22		
252	406800	7219200	1759.75	25		

## Cálculo de reservas

- Se genera una rutina donde los input son el n° de columna y las coordenadas del centroide del bloque X,Y,Z
- Output es el io3 acumulado y el número 1 si es reserva y 0 si no es reserva.
- Posteriormente se puede importar al modelo de bloques el atributo reserva para realizar la planificación minera.
- También se puede calcular fácilmente la potencia de reserva de la columna
- Reservas Unfolding = 4.3 Mt, Ley = 312 ppm i3
- Reservas Modelo Isoley= 10.5 Mt, Ley = 300 ppm i3

## RUN

N° Columna	X	Y	Z	i3	i3 acum	RESERVA
248	406800	7218400	1744.25	265	265	1
248	406800	7218400	1743.75	342	303	1
248	406800	7218400	1743.25	272	293	1
248	406800	7218400	1742.75	144	256	0
248	406800	7218400	1742.25	61	217	0
248	406800	7218400	1741.75	31	186	0
248	406800	7218400	1741.25	56	167	0
248	406800	7218400	1740.75	75	156	0
248	406800	7218400	1740.25	83	148	0
248	406800	7218400	1739.75	66	140	0
248	406800	7218400	1739.25	48	131	0
248	406800	7218400	1738.75	53	125	0
250	406800	7218800	1756.75	140	140	0
250	406800	7218800	1756.25	142	141	0
250	406800	7218800	1755.75	150	144	0
250	406800	7218800	1755.25	115	137	0
250	406800	7218800	1754.75	69	123	0
250	406800	7218800	1754.25	42	110	0
250	406800	7218800	1753.75	24	98	0
250	406800	7218800	1753.25	15	87	0
250	406800	7218800	1752.75	19	80	0
250	406800	7218800	1752.25	21	74	0
250	406800	7218800	1751.75	21	69	0
250	406800	7218800	1751.25	18	65	0
252	406800	7219200	1765.25	162	162	0
252	406800	7219200	1764.75	218	190	0
252	406800	7219200	1764.25	178	186	0
252	406800	7219200	1763.75	89	162	0
252	406800	7219200	1763.25	29	135	0
252	406800	7219200	1762.75	14	115	0
252	406800	7219200	1762.25	15	101	0
252	406800	7219200	1761.75	18	90	0
252	406800	7219200	1761.25	20	82	0
252	406800	7219200	1760.75	21	76	0
252	406800	7219200	1760.25	22	71	0
252	406800	7219200	1759.75	25	68	0

## Conclusiones

- El yodo es un elemento muy importante en la industria mundial.
- Los depósitos de yodo deben también producir otros elementos de interés asociados, tales como el nitrato.
- Se recomienda utilizar unfolding en la estimación y no usar isopleyes en la estimación de recursos.
- Se recomienda usar límites blandos, no restringir uso de muestras y usar un tamaño de bloques de acuerdo a la malla de perforación.
- Malla de 50x50 metros es adecuada para el cálculo de recursos medidos, 100x100 metros para recursos indicados y en el caso de los recursos inferidos es importante entender la continuidad geológica del depósito.
- Determinación de ley de corte para reservas debe considerar los diferentes escenarios debido a los variables del precio del yodo.

## **Bibliografía**

- Análisis recursos salinos 2013, Cochilco.
- Anuario Minería de Chile 2015, Sernageomin.
- Tesis origen del yodo y cromo en el desierto de Atacama, Alida Perez, Universidad de Chile.
- Geology and Origin of the Chilean Nitrate Deposits, George Ericksen.
- La industria del yodo en Chile, Dra Ingrid Garcés Milla.
- Apuntes Geoestadísticas Diplomado U de Chile.
- Libros y Software Alpha Rho, Dr. Marco Alfaro.
- Artículos de Cochilco, Sernageomin, Wikipedia y otros.

# Gracias

Andrés Beluzán  
Ing. Civil Minas  
P.C. Geoestadística #215



**ABelco**

[www.abelco.cl](http://www.abelco.cl)