

**MODELOS MULTIVARIABLES PARA PREDECIR EL EXTRACTABLE
DE NÍQUEL POR LA COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA MENA
TECNOLÓGICA EN EL PROCESO CARON**

**Multi-variable Models to predict the Efficiency of Nickel reduction by the
chemical composition of lateritic ore at Punta Gorda Plant**

**Antonio R. CHANG-CARDONA¹, María Magdalena TOIRAC-SUÁREZ¹,
Jorge ARCE- MOLINA¹**

(1) Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. E-mail: achang@ismm.edu.cu

RESUMEN- La investigación tuvo el propósito de determinar los modelos que con mayor efectividad puedan predecir el extractable de Ni al variar la composición química-mineral de la mena tecnológica que alimenta a los Hornos Herreshoff. Se realizó en una Loza (8 hornos) de la planta de Punta Gorda para turnos de 8 horas durante tres meses aproximadamente. El procesamiento estadístico de las Bases de Datos se realizó en EXCEL. Como resultado, se obtuvieron varios modelos multi-variables con efectividades de pronóstico del extractable de Ni superiores que 95 % para ser probados en el escalado hacia toda la Planta de Horno; se demostró la elevada efectividad del pronóstico del extractable de Ni, al organizar la limpieza o el filtrado de las BD Sucias por intervalos de la relación Limonita / Serpentina (R5) en lugar de la relación de contenidos de Fe*Ni/ Mg*Si (No. Mineral); Se confirmó la validez del procedimiento de filtrado de Datos para ajustar los modelos multi-variables en el caso particular de la Tostación reductora de menas lateríticas de Ni y Co, el cual puede ser empleado para crear un software integrado con la información existente en la INTRANET de una empresa para su uso en tiempo real. Se fundamentaron las regularidades en el comportamiento de los signos y valores de los coeficientes de regresión y correlación, al ser comparados los mejores modelos de las BD de composición química y mineralógica, enfatizando en las contradicciones de las variables: Fe, Al y sus minerales, así como el Ni.

Palabras clave: Modelación multi-variable, proceso Caron, metodología de investigación.

ABSTRACT- The main purpose of the present paper was to determine the multi-variable models to predict the Efficiency of Nickel reduction with greater effectiveness, when varying the chemical-mineralogical composition of lateritic ores in the Herreshoff furnaces. The research was made in a Loza (8 furnaces) of Punta Gorda Plant for working periods of 8 hours during three months. The data bases and their statistical processing were made in EXCEL. As a result, several multi-variable models were obtained , with effectiveness of prognosis superior than 95

%; the high effectiveness to predict the Efficiency of Nickel reduction was demonstrated when organizing the procedure of filtering Data Base by intervals of Limonite: Serpentine ratio (R5); it was confirmed the validity of the procedure of filtering Data Base to adjust the multi-variable models in the particular case of reduction roasting of lateritic ores, which can be employed to create an integrated software for its use in real time with the information in the INTRANET of plant; it was explained the regularity in the signs and values behaviour of regression and correlation coefficients when comparing the best models of chemical and mineralogical data bases, with emphasis on the contradictions of the Ni variable, as well as the variables of Fe, Al and its minerals.

Keywords: Multi-variable modeling, Caron process, methodology of investigation.

INTRODUCCIÓN

Los modelos multi-variables empíricos del tipo estadístico requieren de una gran cantidad de observaciones (N) que garanticen la estructura de variación de la calidad de la mena tecnológica para un año típico de trabajo de la empresa. La complejidad mineralógica de las mezclas de minerales de los horizontes limoníticos y serpentiniticos determinan un conjunto de complejas transformaciones fisico-químicas durante su tostación reductora en los Hornos Herreshoff por determinadas regularidades en el comportamiento de sus metales principales, que definen el resultado de los extractables de Ni y Co en diferentes condiciones técnico-operativas. En estos casos, los métodos de limpieza estadísticos que se basan en el análisis de los residuos no pueden ser aplicados por su carácter mecánico respecto al mencionado comportamiento. Por tales razones, el procesamiento de las base de datos (BD) requiere del cumplimiento de una serie de pasos como son:

- Seleccionar los datos que estén dentro de un patrón tecnológico que corresponda al normal funcionamiento de la tecnología.
- Limpiar la BD por los errores absolutos del extractable de Ni y de la relación Limonita/Serpentina (R5), por intervalos de confianza de este último.
- Determinar los modelos con combinaciones de variables que garantizan efectividades de pronóstico del extractable de Ni (Ni Ext) superiores al 93 – 95 %.

En investigaciones anteriores (Chang et al, 2005 b) se validó dicho procedimiento para una BD de composición mineralógica. También hay que tener en cuenta, la importancia de los modelos estadísticos para detectar errores subjetivos, relacionados con las fallas en el pronóstico del Ni Ext, lo que permite complementar la limpieza realizada por el error absoluto (BD Limpia Intermedia). Después, se obtienen los modelos más efectivos, a partir de una BD Limpia Final, lo cual no fue abordado en el referido artículo y será objeto de análisis del presente trabajo.

Una de las principales insuficiencias de los modelos estadísticos es la variabilidad de los coeficientes del modelo con el incremento del número de observaciones (N) y de otros factores técnico-operativos de la planta comercial, que en ocasiones limita su uso por no comprender la necesidad de asegurar su corrección. Para utilizar eficazmente los modelos multi-variables en la industria se necesita confeccionar una herramienta automatizada que acumule los datos seleccionados, actualice los errores absolutos y auto-ajuste los coeficientes del modelo, de acuerdo a la situación concreta de cada loza (8 hornos) en la planta de hornos de reducción. Por tal razón, la solución integral del problema es multi-disciplinario, en cuya solución participan tecnólogos e informáticos.

El presente artículo se limitará a tratar el objetivo específico de obtener los modelos matemático-estadísticos para predecir el extractable de Ni en dependencia de la composición química de la materia prima alimentada a los hornos de reducción. Además, sus resultados serán comparados con los del trabajo Chang et al (2005 b).

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se realizó en la Loza II de la Planta de hornos de reducción en la empresa niquelífera Cmdte. Ernesto Che Guevara, conocida mundialmente como Planta de Punta Gorda. Los materiales empleados son los industriales, garantizándose las semejanzas de sus propiedades físicas, al considerar la variación de sus características durante los tres meses de investigación.

El método empleado se basó en el aseguramiento de los factores que determinan la semejanza técnico-operativa de la Unidad Demostrativa de Producción (UDP), respecto a toda la planta. Los detalles metodológicos se ofrecen en Chang et al (2005).

Los análisis químicos de Ni, Co, Fe, Mg, Si, Al, Mn, Cr, como contenido total en las muestras HR1, además de Fe (II) en forma de FeO, Fe (III) y Si libre, se realizaron en el laboratorio "Elio Trincado" de la Empresa Geólogo - Minera de Oriente (GMO), el cual está certificado por las Normas de la serie ISO para análisis de minerales industriales. Se emplearon las técnicas de ICP y análisis volumétrico, según el tipo de elemento. Como son las mismas muestras, los resultados de los extractables de níquel y cobalto, así como los contenidos de Fe, Ni, Co y humedad en HR1, se tomaron del Laboratorio Central de la empresa Punta Gorda para los turnos válidos, los cuales se publican en la INTRANET de la empresa para evitar los errores

en el tratamiento de la muestra HR4 con destino a GMO, como se analizó en Chang et al, 2005 b(*).

Las BD que se analizarán serán dependientes de los extractables de Ni y Co en la Loza y se dividirán en: a) Composición química; b) No. de Mineral (Relación de los contenidos de Fe* Ni/ Mg*Si); c) Relación Limonita/Serpentina (R5), las que se denominarán BD Sucias y se compararán los resultados de R5 que se obtuvieron en el artículo de Chang et al, 2005 b(*) con la BD del No. Mineral, por ser el primero un competidor del segundo, que es el actual indicador empleado para valorar la calidad de la mena tecnológica en la Planta de Punta Gorda. La organización de dichas BD y su procesamiento estadístico se realizó en EXCEL con sus herramientas para el análisis de datos. Para la limpieza de las BD Sucias se empleará el mismo procedimiento del referido artículo, basado en los errores absolutos del Ni Ext, No. Mineral y R5.

Como resultado, se obtendrá una BD Limpia Intermedia, a la cual se le diagnosticarán las fallas de los modelos en su pronóstico, eliminando los datos que se les compruebe la causa del error contradictorio, respecto al Ni Ext obtenido por la empresa. La BD Limpia Final resultante servirá para establecer las efectividades potenciales de los modelos ajustados a las condiciones experimentales de la UDP.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestra la estructura general de las BD Sucias de forma integrada, colocando en la primera columna, el número real de la observación (N) que ocupa en la BD, correspondiente, al día inicial y final de cada mes de prueba. En la Tabla 2 se ofrece un resumen de los errores absolutos de diferentes variables para cada mes de investigación en la Loza II y sus promedios generales ponderados.

En la Tabla 3 se muestran las BD Limpias Intermedias de forma integrada, cuando se organizó la limpieza por intervalos de R5, con la misma estructura de las BD Sucias (Las BD completas se ofrecen en el Reporte técnico Chang et al, 2005a). En comparación con la Tabla 1, se limpiaron 63 turnos poco confiables.

Análogamente, en la Tabla 4 se muestra la BD Limpia Intermedia, pero cuando se organizó la limpieza por intervalos de No. Mineral. La cantidad de turnos resultantes en esta tabla es mucho menor (125) que en la tabla 3 (137), debido a que el error absoluto del No.

Mineral (0,311) es más del doble que el de R5 (0,125), como se demostró en Chang et al, 2005 b(*). Este resultado demuestra la conveniencia de organizar la limpieza por valores menores o iguales que el intervalo de confianza de R5 y realizar la modelación empírica por dicha BD.

Los resultados de los coeficientes de correlación par, se muestran en la Tabla 5 y el rango de variación de los contenidos de diferentes metales se ofrece en la Tabla 6.

En la Tabla 6, se observa un amplio rango de variación de los principales metales, típico para un año de producción de la empresa, lo cual es importante para comenzar la modelación empírica.

Los modelos multi-variables individuales con mejores resultados fueron aquellos que no contenían Cr, y en la mayoría de los casos, se excluyó además, el Mn. En el caso de los modelos multi-variables simplificados integrados resultaron más efectivos los modelos 181 y 184. La selección de los mejores modelos se realiza por el cálculo de su Efectividad General del pronóstico del Extractable de Ni respecto a las BD industrial Limpia Intermedia por la metodología explicada en el artículo Chang et al, 2005 b(*). En la Tabla 7 se resumen los modelos más efectivos, incluyendo el ejemplo de escritura del modelo 101 como ilustración para el resto.

La efectividad general de un 93, 4 % en el pronóstico del Ni Ext respecto al error absoluto de 3,1 es bastante bueno, ya que solo en 6 ó 7 ocasiones de cada 100 es posible errar, facilitando el análisis de las causas de dichas fallas. En las Figuras 1-3 se muestran los gráficos comparativos entre los extractables de Ni en la Loza II y el pronosticado por el modelo 101, para cada turno y día, durante los meses de investigación. En estas, se señalan con puntos rellenos y números del 1 al 9 sobre el gráfico de pronóstico, los días y turnos que superaron el error absoluto de 3,1 en los tres meses muestreados, los cuales corresponden a las fallas del modelo pronóstico respecto al real (LOZA II). También se muestra en dichas figuras, pero sobre el gráfico del Ni Ext Loza, con puntos rellenos, los saltos, de un turno respecto a su anterior, superior al intervalo confiable de Ni Ext = 5,2 durante la operación normal de la Planta de Hornos, como respuesta a las variaciones bruscas de la calidad de la mena tecnológica o a errores en la información que se ofrece en los datos de origen. En cualquiera de los casos, la localización de las causas de errores subjetivos permiten eliminar 9 turnos de la Tabla 3 (7 fallas y 2 del salto 3 en la fig. 1) y formar las BD Limpias Finales con 128 datos, cuyo procesamiento informará sobre la potencialidad real de pronóstico del Extractable de Ni por los modelos seleccionados

(Tabla 8). El análisis detallado de las causas de fallas y saltos se realizó en el reporte técnico Chang et al, (2005a) y se resume en el artículo Chang et al (2005 b).

La comprobación de la calidad de la limpieza efectuada se realiza construyendo los gráficos de extractables de Ni y Co en función de R5 y No. Mineral para las BD "Sucia y Limpia Final". Los síntomas de que es correcto el procedimiento son: a) la tendencia de incremento de ambos extractables se mantiene en cada BD; y b) Los valores del coeficiente de determinación R^2 para la curva poli-nómica de segundo orden correspondiente al extractable de Ni se incrementa apreciablemente, y la de Co en menor medida, pero aumenta. Esto se aprecia en las figuras 4 y 5 para R5, y Figuras 6 y 7 para No. Mineral. En el artículo de Chang et al, (2005 b) se publicaron dichas funciones para las BD Limpias Intermedia.

Al comparar los modelos multi-variables integrados en una (R5 y No. Mineral) es necesario referirse a la Tabla 9, en la cual se muestra los principales indicadores estadísticos y las efectividades generales de pronóstico del extractables de Ni para diferentes BD. Para la situación actual de una BD Sucia, ambos modelos son inefectivos, al no superar el 71 %. Al limpiarse esa misma BD por intervalos de R5 y hacer la limpieza final, el modelo lineal de R5-Fin alcanza un 96,09 % de efectividad general de pronóstico para efectividades puntuales mayores o iguales que 99,5 %, la cual es superior al del No. Mineral. Cuando se limpia por intervalos de No. Mineral para obtener una BD Limpia Intermedia, la efectividad general de pronóstico del Ni Ext se encuentra muy por debajo del 90 % con 12 turnos menos, lo que demuestra la necesidad de limpiar la BD de composición química por intervalos de R5. Estos argumentos refuerzan la hipótesis de sustituir al No. Mineral por R5, como indicador para valorar la calidad de la mena tecnológica producida por la mina (SM2) y preparación de mineral en SM8.

La comparación de las mejores combinaciones de variables para dos prototipos de modelos de composición química y dos de composición mineralógica, representados en las Tablas 10 y 11, permite demostrar la variación o evolución de los valores y signos de los coeficientes de regresión de cada una de las variables y la intercepción para las tres BD analizadas. Para los modelos del prototipo 101 y 105 se observa una buena estabilidad de los signos y valores de los coeficientes de regresión, si se compara con los prototipos del modelo 8 de composición mineralógica, los cuales muestran un apreciable cambio en cada tipo de BD.

El Fe y sus minerales poseen los más altos contenidos en la composición de la mena tecnológica, lo que determina en gran medida el resultado final del extractable de Ni

pronosticado, resultando preocupante el signo negativo del Fe en los modelos 101 y 108 (contrario al de su coeficiente de correlación par), lo cual puede ser explicado por el balance de influencias de los diferentes minerales enlazados con éste (ver los signos de la Gohetita, Nontronita y Magnetita- Maghemita en los prototipos del modelo 2 y 8). Al ser la Nontronita muy estable en sus coeficientes negativos, tanto el de correlación par como el de regresión, con contenidos mucho más bajos que los dos restantes minerales de Fe; entonces el nivel de aporte o disminución al extractable de Ni en sus respectivas ecuaciones de regresión dependerá de la relación de contenidos que exista entre la Gohetita y el sistema mineralógico Magnetita-Maghemita, ya que en todos sus modelos tienen signos contrarios, a pesar de sus elevados y positivos coeficientes de correlación par, lo que sugiere la posibilidad de controlarlos en la mina y en el reciclado de polvo en Planta de Hornos de reducción. Los prototipos del modelo 2 son los únicos que dan un balance positivo, y por tanto, un aporte al Ni Ext, lo que desde el punto de vista tecnológico es correcto, contribuyendo de forma decisiva a obtener coeficientes libres (intercepción) menores que 85, en contraste con el resto de los modelos que son superiores a 100 en casi todos los casos. De aquí se deduce, *la utilidad de los prototipos del modelo 2 para diagnosticar el proceso con elevadas efectividades, reflejándose en su capacidad de detectar más fallas* que el resto, lo que se ilustra en las Figuras 8 y 9 para el mes de Junio. De esta manera, para el modelo 2 habrá otra etapa de limpieza de la BD Limpia Final con 4 datos menos, cuyo modelo ajustado tendrá mejores indicadores estadísticos y efectividades superiores al 99 %.

La ley de Ni es sumamente importante en la tecnología y como regla, permanece bajo un estricto control para mantenerlo en un elevado rango. Sin embargo, todos los modelos de los prototipos 101 y 105 dan coeficientes de correlación par negativos y muy pequeños en valores, como en el caso del Al, lo cuál es sintomático de una función poli-nómica de segundo grado que tiene doble comportamiento en el rango de valores que se estudió, como se muestra en la Figura 10 para el Ni; o sea hasta valores alrededor de 1,3 % se alcanza un máximo, a partir del cual, el incremento de la ley de Ni, tiende a disminuir, afectando también al Co. Dicho comportamiento corresponde con el aumento del contenido de minerales del grupo de la Serpentina que son ricos en Ni, que disminuyen los valores de R5 y por tanto, de ambos extractables. Desde el punto de vista práctico, esta regularidad permite controlar en el proceso, los límites de la ley de Ni en correspondencia con la relación Limonita: Serpentina (R5).

Para continuar con *el doble comportamiento del Al*, representado en la figura 11, se observa que a valores mayores que 4,6 % de Al, el extractable de Ni tiende a disminuir, mientras que el de Co continua incrementándose; *tal regularidad confirma que se ha incorporado más minerales de la capa superior de LB cerca del contacto con la de escombros, que es más rica en Co*. El aporte del aluminio al Ni Ext en los prototipos del modelo 105 es ligeramente negativo en la BD Limpia Intermedia (con un máximo de -1,4 %), anulándose su influencia en la BD Limpia Final (max -0,16 %); mientras que para la BD Sucia su aporte es ligeramente positivo (1,8 %). En todos los casos existió una plena correspondencia de los signos y significación de valores entre los coeficientes de correlación par y los de regresión. Sin embargo, en los modelos del prototipo 2, los dos minerales principales con los cuales se asocian tienen comportamientos diferentes, ya que la Halloysita siempre manifiesta una clara influencia negativa como corresponde a su naturaleza serpentinitica, mientras que la Gibbsita refleja un mayor aporte al Ni Ext, pero en contradicción con los signos del coeficiente de correlación par. Como resultado, se obtiene un balance positivo en el aporte para las BD Limpia Final y BD Sucia, siendo prácticamente despreciable (menor que 0,23 su valor negativo) en la BD Limpia Intermedia. Tales resultados se corresponden mejor con la influencia positiva que ejerce la Gibbsita, como el segundo mineral mayoritario del horizonte limonítico (LB), sobre el Ni Ext en el proceso Caron.

El resto de los metales y minerales involucrados en los prototipos de modelos de las Tablas 10 y 11, son muy estables en signo y valores para los análisis de regresión y correlación par, correspondiéndose con el carácter de sus influencias sobre los extractables de Ni y Co. Por tanto, se recomienda emplear preferentemente, la combinación de variables de los modelos del prototipo 2 para diagnosticar la tostación reductora de las menas lateríticas, lo que no excluye la evaluación del resto de los modelos recomendados en la etapa de escalado hacia toda la Planta de Hornos.

En la Tabla 12, para la condición de limpieza por intervalos de R5, se comparan los modelos multi-variables integrados en: No. Mineral para las BD de composición química y R5 para las BD de composición mineralógica. Ambos grupos de modelos se caracterizan por coeficientes muy estables y cercanos en valores, que los distinguen de los modelos por combinaciones de variables independientes. Todas las funciones lineales y poli-nómicas representadas en la Tabla 12 se caracterizan por indicadores estadísticos muy parecidos, aunque

menores que los de las Tablas 10 y 11. Para las BD Limpias, las efectividades generales respecto al 99,5 % de efectividad puntual, se encuentran en un 2-3 % por debajo del resto de los modelos. Sin embargo, para el 99% de efectividad puntual, solamente en el caso de la BD Limpia Final del modelo poli-nómico de segundo orden del No. Mineral alcanza una efectividad general casi ideal (superior al 99 %), mejorando la potencialidad del pronóstico futuro de todos sus competidores; mientras que los demás modelos de la Tabla 12 mantienen sus efectividades generales iguales o menores que el resto. Tal comportamiento, sugiere la necesidad de evaluar los modelos de las BD Limpias durante el escalado hacia toda la planta, como medida de vigilancia del indicador de calidad de la mena tecnológica.

Si los Modelos finales se utilizan para pronosticar el Ni Ext en el resto de las BD, se obtendrán efectividades muy parecidas a las reflejadas en las Tablas 10-12 para cada BD, como se muestra en la Tabla 13. Estos resultados demuestran la necesidad de ajustar los modelos finales para las BD industriales limpias, las cuales varían sus coeficientes al variar el número de observaciones, los errores absolutos involucrados y otros factores. Por tanto, es imprescindible crear un software que trabaje en tiempo real sobre la Intranet de la Empresa para garantizar su confiabilidad y rapidez del resultado. Dichos modelos actualizados serán empleados diariamente para seleccionar la información confiable que formarán parte de la BD Limpia de la Empresa por la que se realizarán el análisis de Procesos y las predicciones de los Extractables de Ni.

CONCLUSIONES

1. Se obtuvieron varios modelos multi-variables con efectividades de pronóstico del Extractable de Ni superior al 95 % para probarlos en el escalado hacia toda la Planta de Horno.
2. Se demostró la elevada efectividad del pronóstico del extractable de Ni, al organizar la limpieza de las BD Sucias por intervalos de R5 en lugar de No. Mineral.
3. Se confirmó la validez del procedimiento de limpieza para ajustar los modelos multi-variables en el caso particular de la Tostación reductora de menas lateríticas de Ni y Co, el cual puede ser empleado para crear un software integrado con la información existente en la INTRANET de una empresa para su uso en tiempo real.
4. Se fundamentaron las regularidades en el comportamiento de los signos y valores de los coeficientes de regresión y correlación, al ser comparados los mejores modelos de las BD

de composición química y mineralógica, enfatizando en las contradicciones de las variables: Fe, Al y sus minerales, así como el Ni.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este artículo agradecen al colectivo de dirección de la Empresa niquelífera "Cmdte. Ernesto Che Guevara" por el financiamiento del Mega-Proyecto: Modelación Geo-Tecnológica- Ambiental del yacimiento "Punta Gorda" y reconocen el apoyo brindado por los colectivos de dirección administrativa y técnica de la mina, la Unidad Básica de Servicios Técnicos, Planta de Preparación de Minerales y Planta de Hornos, así como al Grupo de Informática de dicha empresa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CHANG, C. A.; ARCE, M. J ; TOIRAC, M.M., (2005 a) : " Modelos multi-variables para predecir los Extractables de Ni y Co por la composición química y mineralógica de la mena ". Reporte técnico final del Suplemento 1 del Contrato 15/03. Proyecto: Modelo Geo-tecnológico – ambiental del Yacimiento Punta Gorda. ISMMM, Moa, 115 p.
- CHANG, C. A.; ARCE, M. J ; TOIRAC, M.M., (2005 b) : " Modelos multi-variables para predecir los Extractables de Ni y Co por la composición mineralógica de la mena tecnológica en el Proceso CARON". *Minería y Geología* (*).

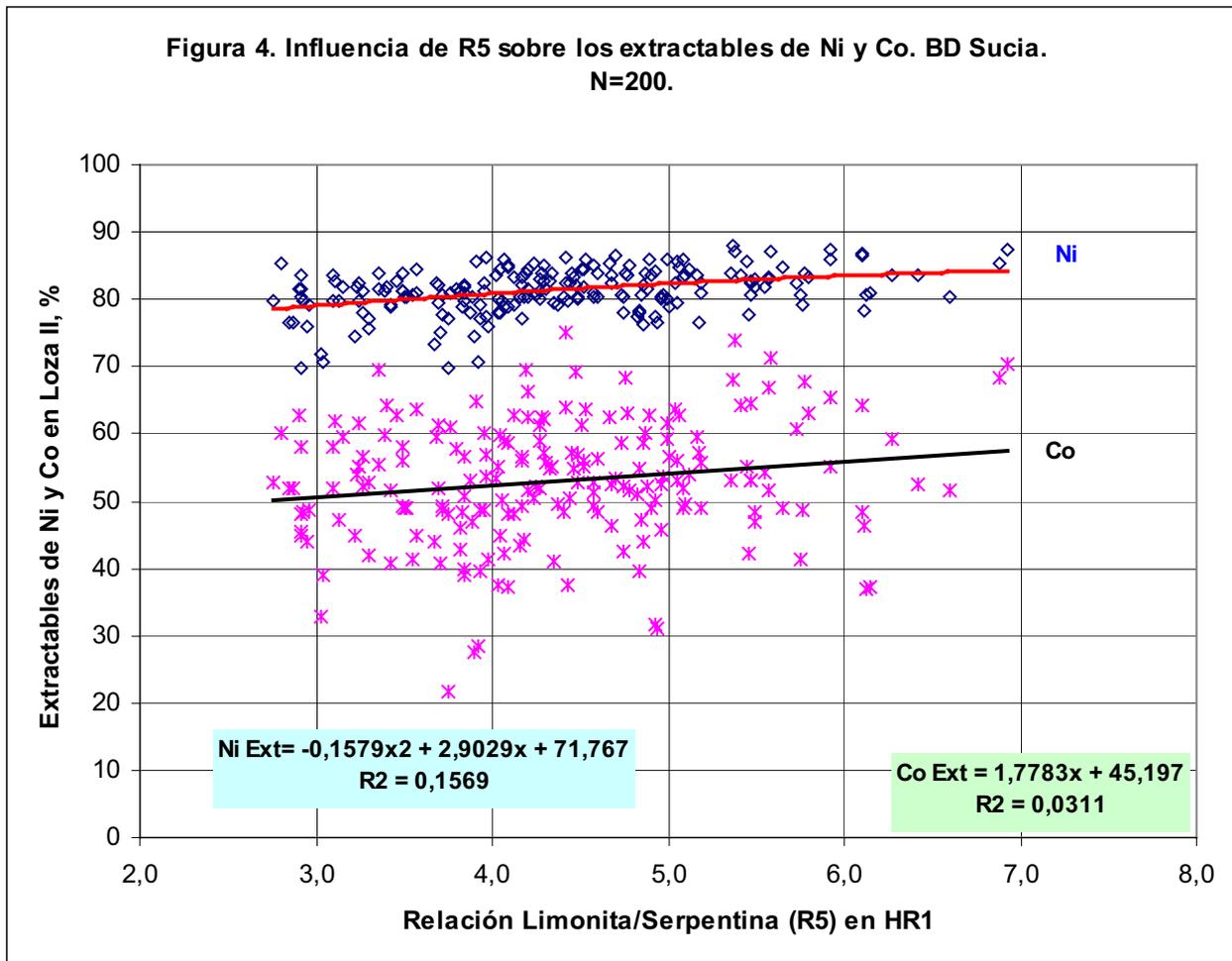
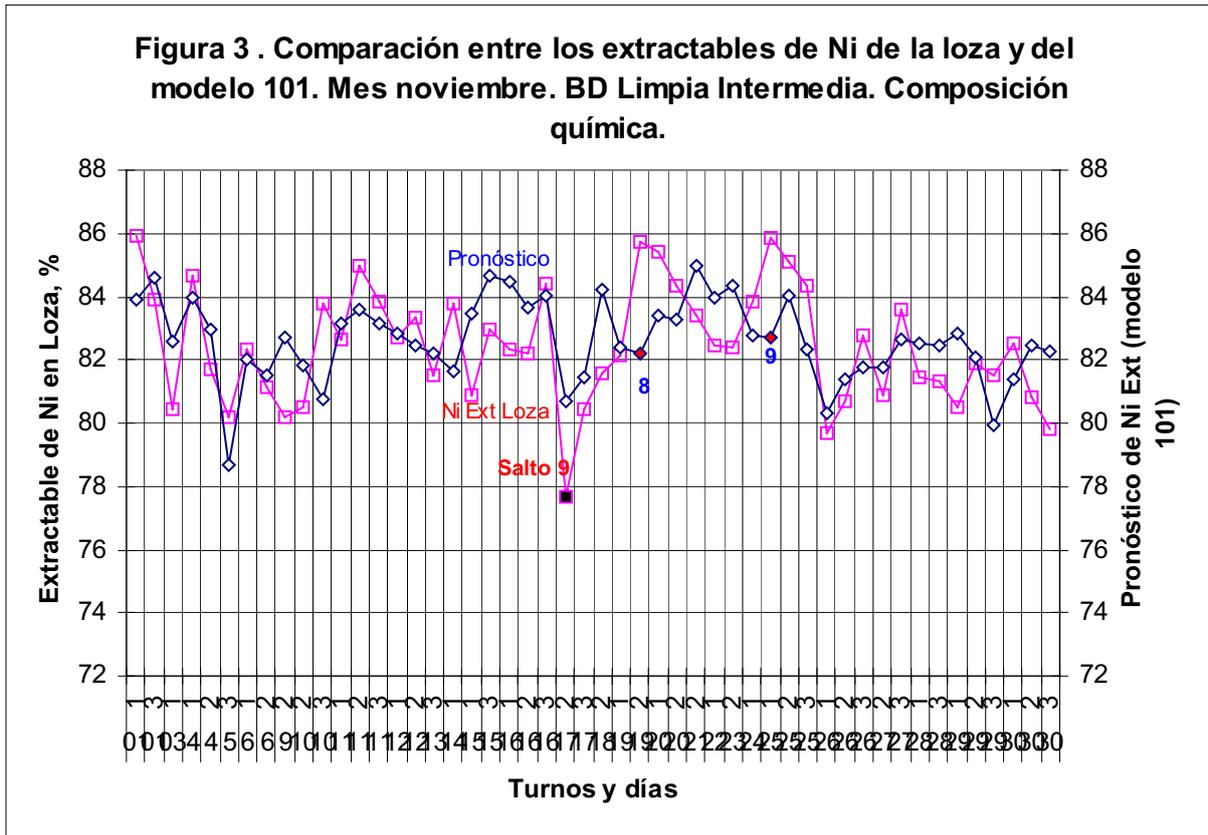


Figura 5. Influencia de R5 sobre los extractables de Ni y Co. BD Limpia final.
N=128.

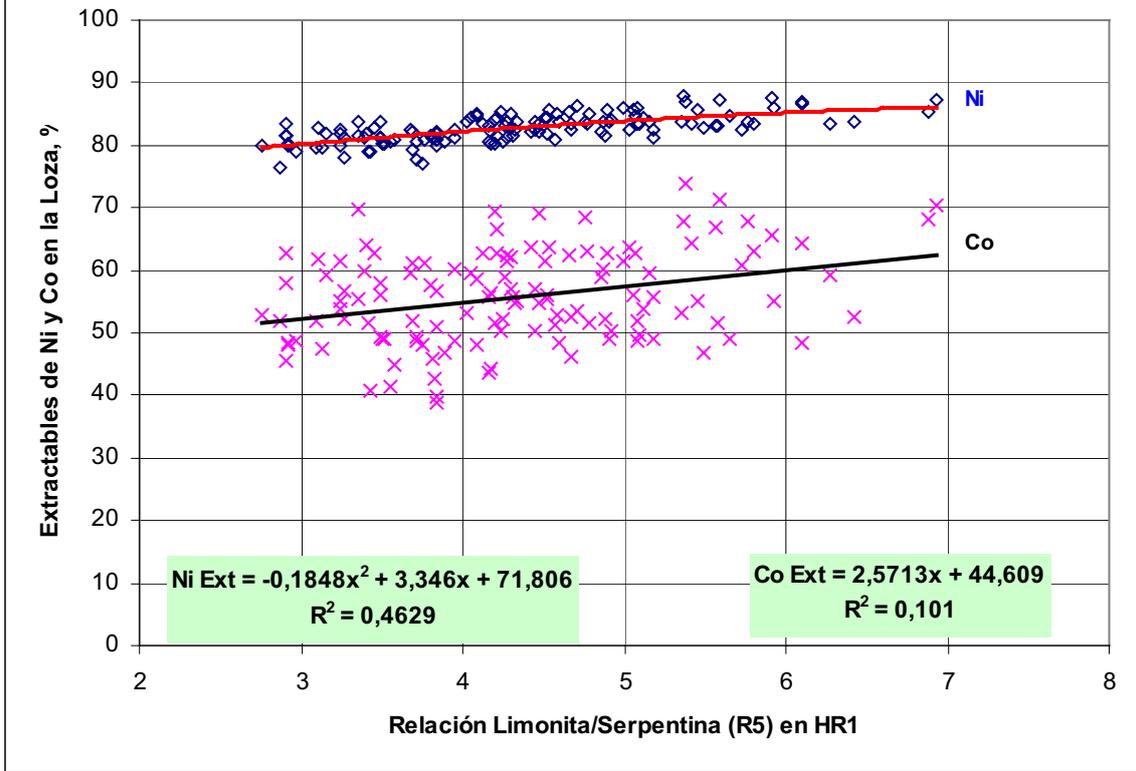


Figura 6. Influencia del No. Mineral sobre los extractables de Ni y Co. BD Sucia.
N = 200.

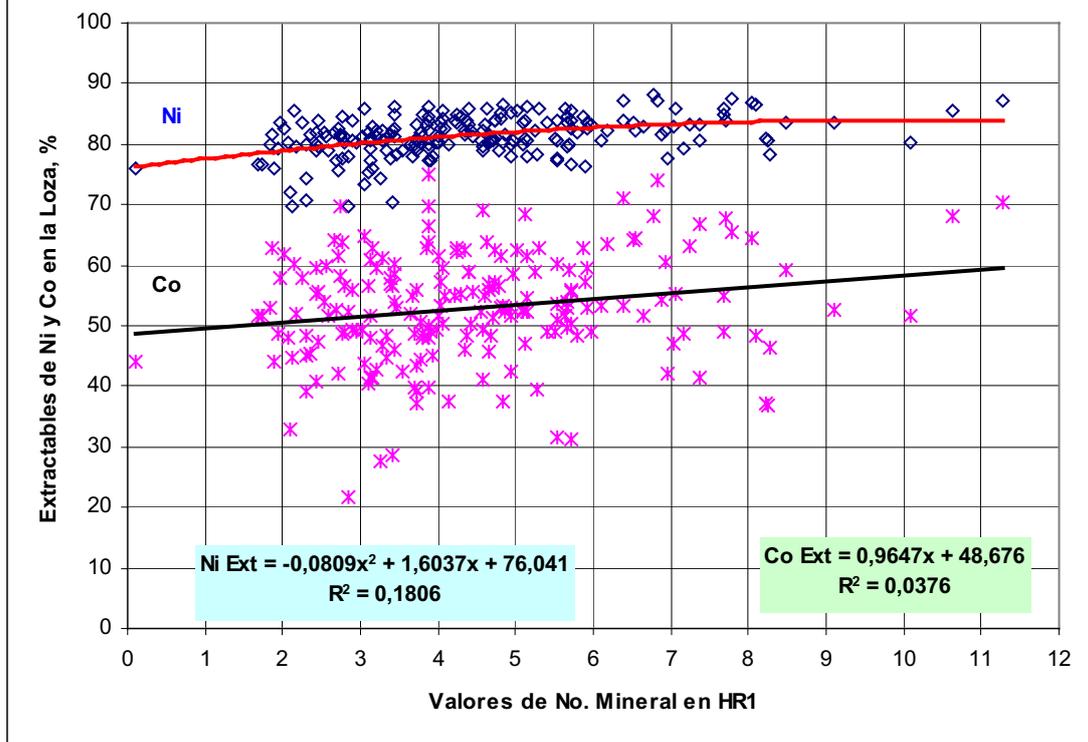


Figura 7. Influencia del No. Mineral sobre los extractables de Ni y Co. BD Limpia final. N =128.

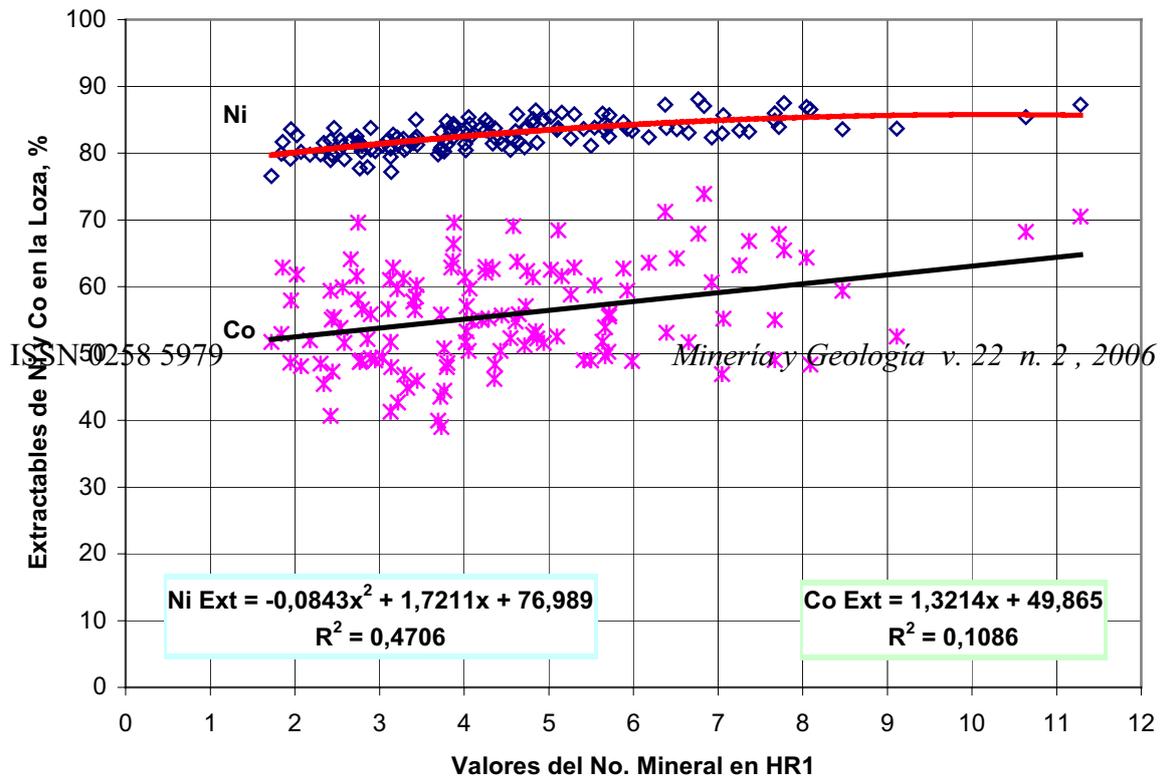


Figura 8. Comparación entre los extractables de Ni de la loza y del modelo 101 final. Mes junio-julio. BD Limpia final. Composición química

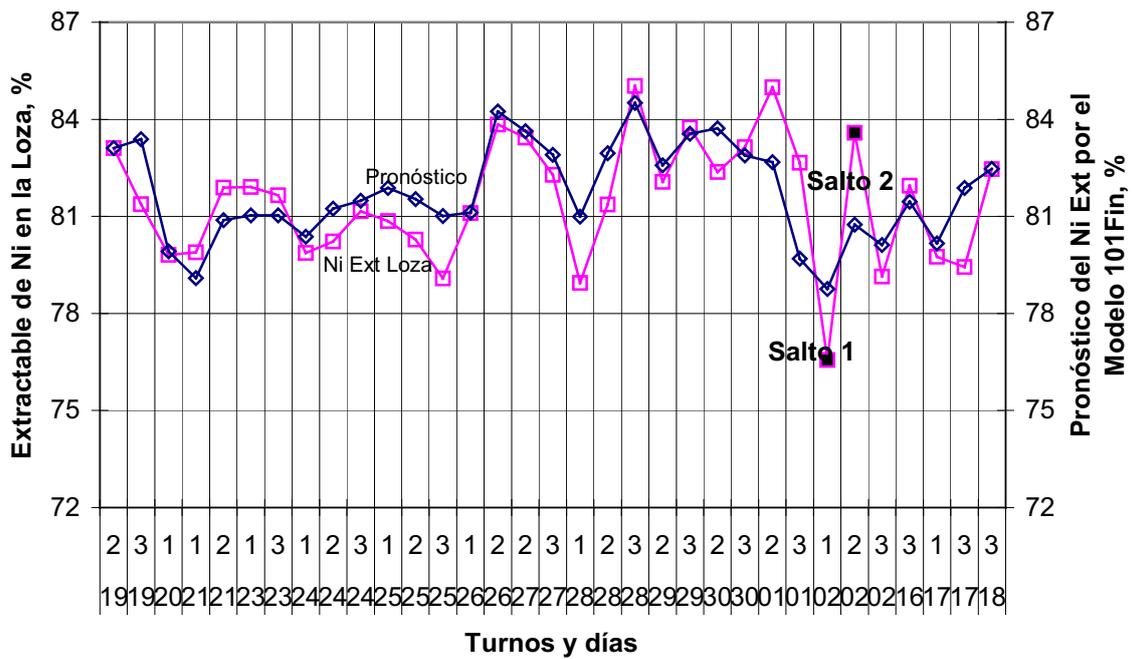
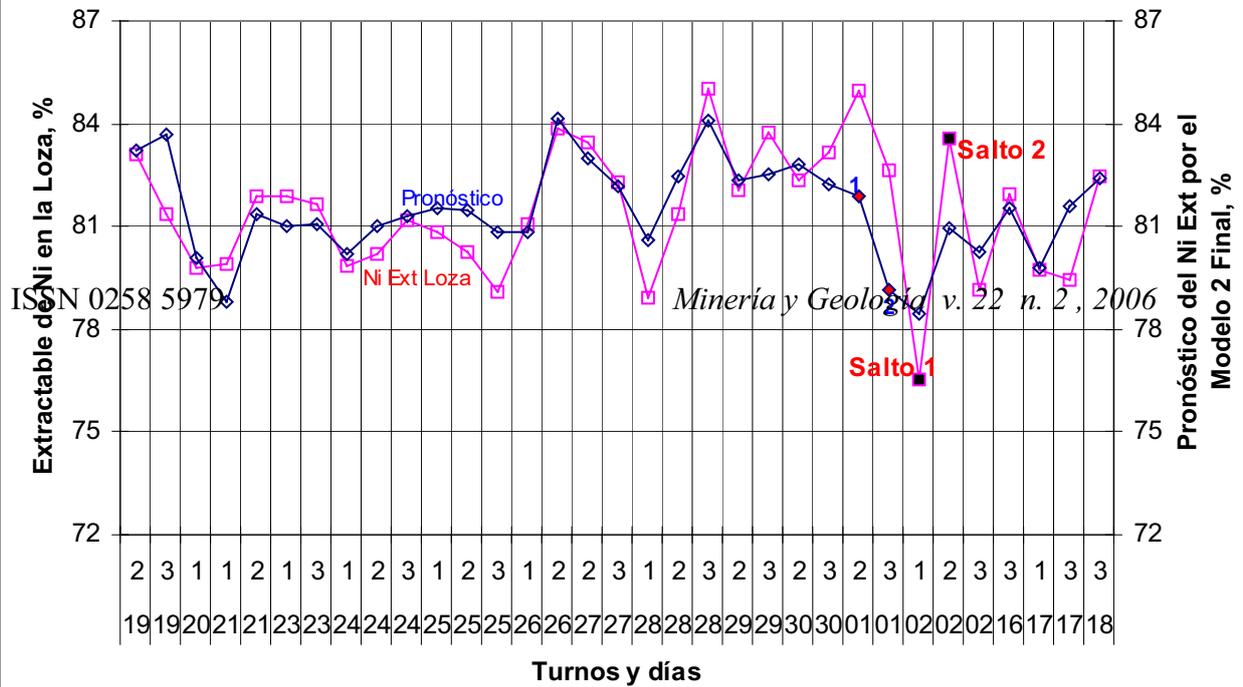


Figura 9. Comparación entre los extractables de Ni de la loza y del modelo 2 Final. Mes junio-julio. BD Limpia Final. Composición mineralógica.



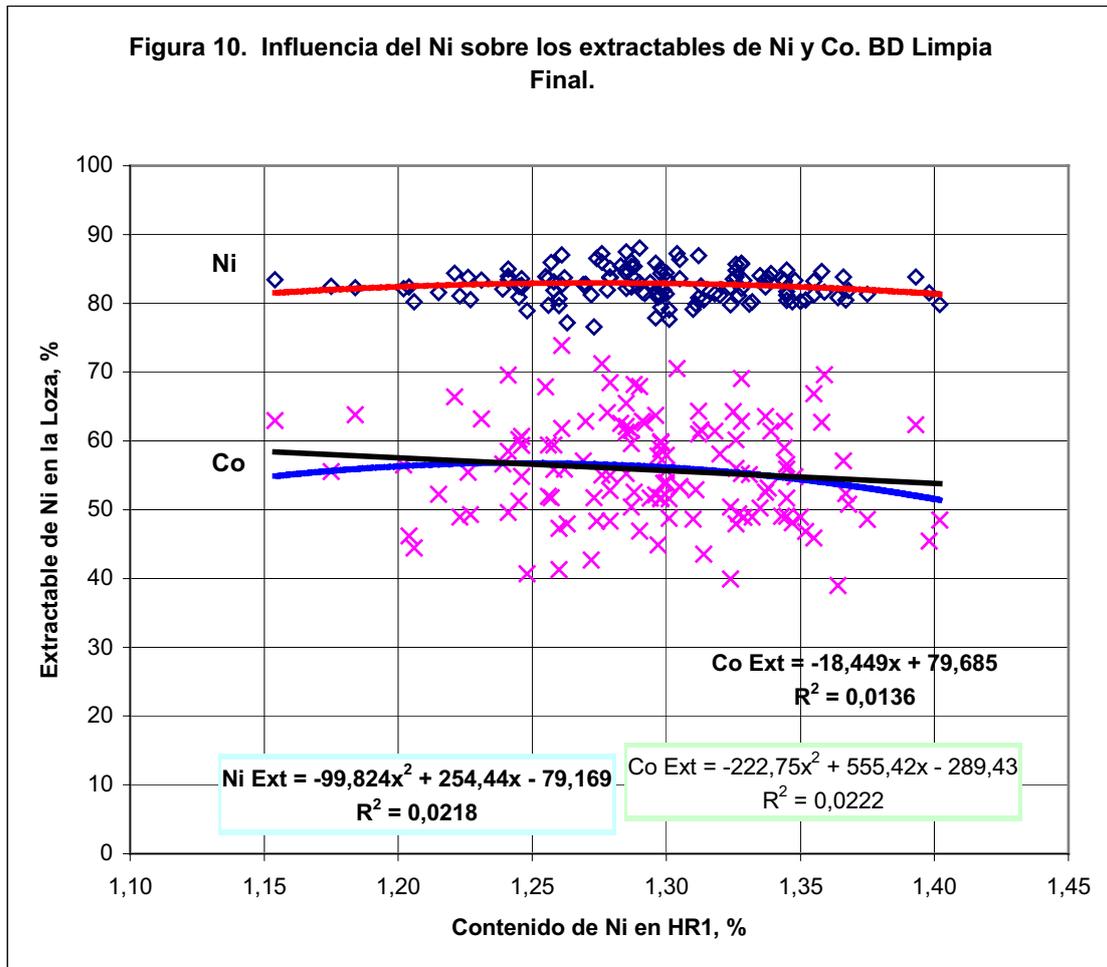


Figura 11. Influencia del Al sobre los extractables de Ni y Co. BD Limpia Final.

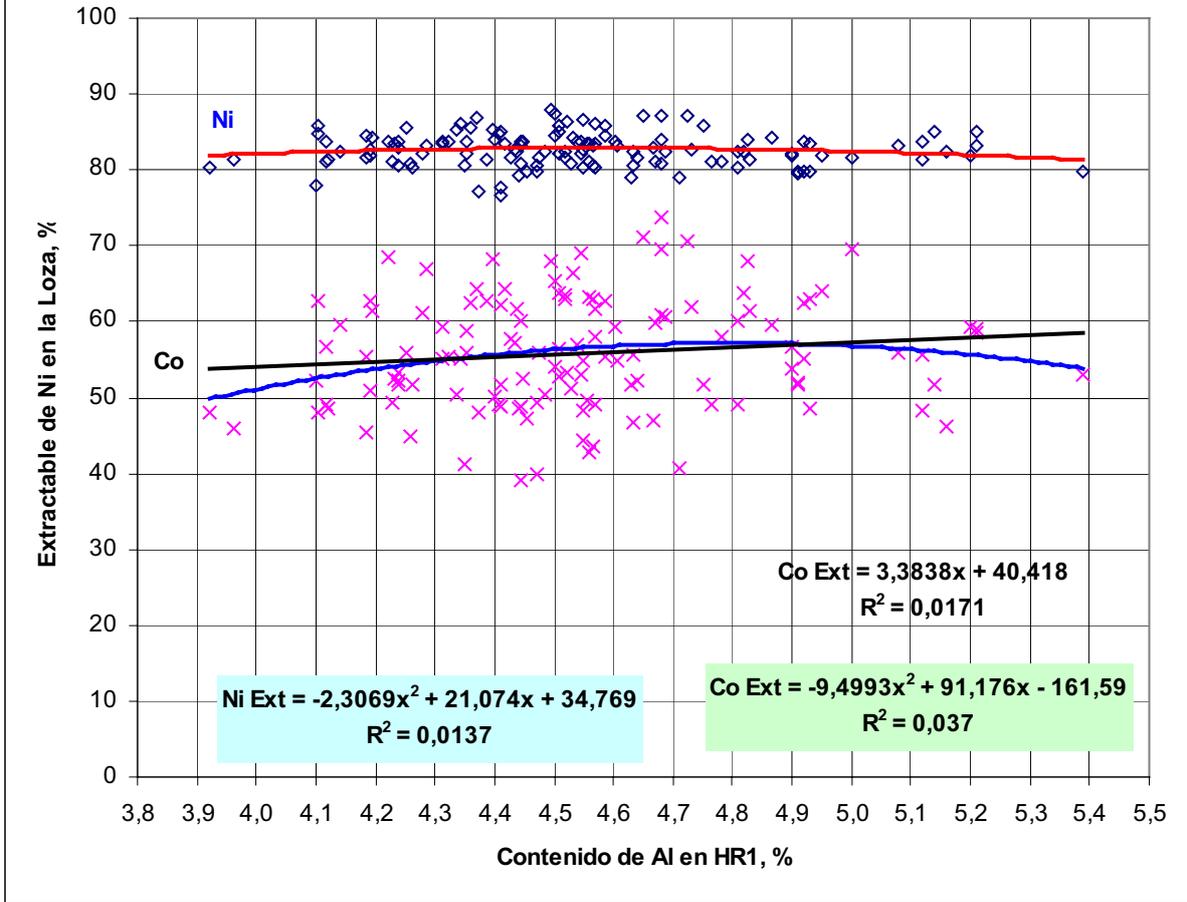


TABLA 1. Base de datos sucia de la composición química.

N	Día	Turno	Ext.Ni	Ext.Co	Fe	Ni	Co	Al	Mg	Mn	Si	Cr	No. Mineral	RS
1	19 de Junio	1	79,466	41,119	39,656	1,342	0,115	5,170	2,790	0,770	4,170	1,700	4,574	4,354
2		2	83,109	59,023	39,587	1,344	0,121	5,210	2,840	0,780	4,250	1,710	4,408	4,266
3		3	81,379	55,713	38,913	1,30	0,119	5,120	2,750	0,770	4,140	1,660	4,443	4,311
27	30	1	80,401	45,702	41,007	1,21	0,115	5,500	2,850	0,720	3,750	1,680	4,643	4,965
28		2	82,367	46,197	39,493	1,204	0,101	5,160	2,850	0,640	3,830	1,600	4,356	4,673
29		3	83,142	55,867	39,058	1,258	0,105	5,080	3,110	0,650	4,240	1,620	3,726	4,167
30	1 de Julio	1	79,928	51,836	39,93	1,198	0,103	5,030	3,130	0,670	4,200	1,610	3,639	4,274
31		2	84,991	58,527	38,855	1,241	0,101	5,210	3,260	0,700	4,310	1,670	3,432	4,087
32		3	82,659	61,825	38,865	1,261	0,104	4,730	4,430	0,660	5,470	1,550	2,022	3,105
45	18	1	75,97	43,92	38,53	1,26	0,104	4,750	4,480	0,650	5,730	1,600	1,891	2,947
46		2	77,95	54,99	38,32	1,257	0,12	5,130	3,000	0,820	4,360	1,730	3,683	4,029
47		3	82,46	60,23	38,98	1,245	0,12	4,810	3,180	0,700	4,440	1,630	3,437	3,952
48	1 de Oct.	1	82,166	69,078	39,525	1,328	0,127	4,54	2,88	0,83	3,98	1,66	4,581	4,472
49		2	83,758	53,136	41,884	1,338	0,12	4,54	2,50	0,82	3,51	1,61	6,392	5,36
50		3	85,702	55,25	40,439	1,328	0,124	4,59	2,25	0,80	3,38	1,59	7,062	5,45
116	31	1	78,068	54,766	42,059	1,334	0,133	4,51	2,81	0,78	3,87	1,60	5,158	4,836
117		2	77,228	49,123	40,303	1,326	0,136	4,46	3,20	0,80	4,28	1,58	3,897	4,171
118		3	80,497	56,318	40,629	1,296	0,134	4,82	2,80	0,80	3,99	1,66	4,703	4,6
119	1 de Nov.	1	85,914	51,772	41,284	1,257	0,132	4,75	2,50	0,81	3,68	1,64	5,635	5,083
120		2	77,685	42,115	40,369	1,281	0,131	4,91	2,18	0,75	3,41	1,65	6,949	5,452
121		3	83,895	67,866	42,449	1,255	0,134	4,82	2,04	0,76	3,38	1,67	7,719	5,769
198	30	1	82,54	61,592	37,26	1,313	0,113	4,44	3,53	0,72	5,09	1,50	2,727	3,248
199		2	80,829	38,986	38,991	1,364	0,113	4,44	3,17	0,67	4,50	1,46	3,732	3,842
200		3	79,798	39,929	39,505	1,324	0,112	4,47	3,11	0,69	4,56	1,47	3,692	3,843

TABLA 2. Resumen de los errores absolutos de los extractables de Ni y Co, R5 y No. Mineral para cada mes de investigación en la Loza II de Planta de Hornos

Mes	EXTRACTABLE			HRI			INDICADOR			TURNOS	
	Ni Ext	Co Ext	Fe	Ni	Co	No Mineral	R5	N			
Jun-Jul	1,787	4,720	0,911	0,039	0,004	0,252	0,108	47			
Octubre	2,326	7,400	0,620	0,030	0,009	0,324	0,125	71			
Noviembre	3,297	6,771	0,549	0,042	0,058	0,333	0,134	82			
Promedio Ponderado	2,600	6,512	0,659	0,037	0,028	0,311	0,125	200			

TABLA 3. Base de datos limpia intermedia por composición química. Limpieza por intervalos de r5.

N	Día	Turno	Co Ext	Ni Ext	Fe	Ni	Mg	Si	Mn	Cr	Al	Co	No. Mineral	R5	R16	R19
1	19 de Junio	2	59,023	83,109	39,587	1,344	2,840	4,250	0,780	1,710	5,210	0,121	4,408	4,266	98,389	28,388
2	19	3	55,713	81,379	38,913	1,30	2,750	4,140	0,770	1,660	5,120	0,119	4,443	4,311	97,048	27,528
23	30	2	46,197	82,367	39,493	1,204	2,850	3,830	0,640	1,600	5,160	0,101	4,356	4,673	94,536	30,879
24	30	3	55,867	83,142	39,058	1,258	3,110	4,240	0,650	1,620	5,080	0,105	3,726	4,167	102,226	33,137
25	1 de Julio	2	58,527	84,991	38,855	1,241	3,260	4,310	0,700	1,670	5,210	0,101	3,432	4,087	100,278	32,079
26	1	3	61,825	82,659	38,865	1,261	4,430	5,470	0,660	1,550	4,730	0,104	2,022	3,105	137,156	39,202
37	18	3	60,23	82,46	38,98	1,245	3,180	4,440	0,700	1,630	4,810	0,12	3,437	3,952	106,179	30,509
38	1 de Oct.	1	69,078	82,166	39,525	1,328	2,88	3,98	0,83	1,66	4,54	0,127	4,581	4,472	94,727	21,857
39	1	2	53,136	83,758	41,884	1,338	2,50	3,51	0,82	1,61	4,54	0,12	6,392	5,36	91,508	19,451
40	1	3	55,25	85,702	40,439	1,328	2,25	3,38	0,80	1,59	4,59	0,124	7,062	5,45	85,791	19,264
86	29	1	63,727	85,818	39,916	1,296	2,83	3,96	0,79	1,63	4,51	0,123	4,624	4,528	96,581	22,582
87	29	3	54,8	83,31	41,462	1,348	2,92	4,16	0,88	1,70	4,61	0,144	4,608	4,467	101,182	21,704
88	1 de Nov.	1	51,772	85,914	41,284	1,257	2,50	3,68	0,81	1,64	4,75	0,132	5,635	5,083	92,546	21,510
89	1	3	67,866	83,895	42,449	1,255	2,04	3,38	0,76	1,67	4,82	0,134	7,719	5,769	85,877	21,475
135	30	1	61,592	82,54	37,26	1,313	3,53	5,09	0,72	1,50	4,44	0,113	2,727	3,248	125,924	31,357
136	30	2	38,986	80,829	38,991	1,364	3,17	4,50	0,67	1,46	4,44	0,113	3,732	3,842	119,919	29,708
137	30	3	39,929	79,798	39,505	1,324	3,11	4,56	0,69	1,47	4,47	0,112	3,692	3,843	122,566	29,607

Leyenda complementaria: R16=Fe*Si/Cr ; R19=Al*Si/Mn

TABLA 4. Base de datos limpia intermedia por composición química.

Limpieza por intervalos No. Mineral

N	Día	Turno	Co Ext	Ni Ext	Fe	Ni	Mg	Si	Mn	Cr	Al	Co	No. Mineral
1	19 de Junio	2	59,023	83,109	39,587	1,344	2,840	4,250	0,780	1,710	5,210	0,121	4,41
22	30	2	46,197	82,367	39,493	1,204	2,850	3,830	0,640	1,600	5,160	0,101	4,36
23	30	3	55,867	83,142	39,058	1,258	3,110	4,240	0,650	1,620	5,080	0,105	3,73
24	1 de Julio	2	58,527	84,991	38,855	1,241	3,260	4,310	0,700	1,670	5,210	0,101	3,43
31	18	1	43,92	75,97	38,53	1,26	4,480	5,730	0,650	1,600	4,750	0,104	1,89
32	18	3	60,23	82,46	38,98	1,245	3,180	4,440	0,700	1,630	4,810	0,12	3,44
33	1 de Oct.	1	69,078	82,166	39,525	1,328	2,88	3,98	0,83	1,66	4,54	0,127	4,58
34	01	2	53,136	83,758	41,884	1,338	2,50	3,51	0,82	1,61	4,54	0,12	6,39
35	01	3	55,25	85,702	40,439	1,328	2,25	3,38	0,80	1,59	4,59	0,124	7,06
80	29	1	63,727	85,818	39,916	1,296	2,83	3,96	0,79	1,63	4,51	0,123	4,62
81	29	3	54,8	83,31	41,462	1,348	2,92	4,16	0,88	1,70	4,61	0,144	4,61
82	1 de Nov.	1	51,772	85,914	41,284	1,257	2,50	3,68	0,81	1,64	4,75	0,132	5,64
83	01	3	67,866	83,895	42,449	1,255	2,04	3,38	0,76	1,67	4,82	0,134	7,72
124	29	2	50,807	81,873	40,026	1,368	3,16	4,60	0,76	1,54	4,19	0,129	3,76
125	29	3	45,428	81,533	37,761	1,398	3,99	5,66	0,72	1,53	4,18	0,115	2,34

TABLA 5. Coeficientes de correlación par de las variables y sus interacciones
BD limpia intermedia. Limpieza por intervalos de r5. N =137.

	Co Ext	Ni Ext	Fe	Ni	Mg	Si	Mn	Cr	Al	Co	R16	R19	No. Mineral
Co Ext	1,000												
Ni Ext	0,519	1,000											
Fe	0,158	0,402	1,000										
Ni	-0,115	-0,065	-0,063	1,000									
Mg	-0,270	-0,637	-0,689	0,085	1,000								
Si	-0,283	-0,653	-0,708	0,123	0,947	1,000							
Mn	0,143	0,466	0,635	0,093	-0,606	-0,572	1,000						
Cr	0,300	0,380	0,325	-0,083	-0,486	-0,498	0,533	1,000					
Al	0,127	-0,063	-0,246	-0,227	0,100	0,081	-0,418	0,191	1,000				
Co	0,211	0,397	0,676	0,188	-0,557	-0,528	0,745	0,334	-0,474	1,000			
R16=Fe*Si/Cr	-0,325	-0,653	-0,547	0,130	0,904	0,954	-0,551	-0,681	-0,040	-0,442	1,000		
R19=Al*Si/Mn	-0,180	-0,594	-0,744	0,005	0,846	0,854	-0,855	-0,457	0,485	-0,737	0,783	1,000	
No. Mineral	0,300	0,612	0,745	-0,010	-0,910	-0,918	0,609	0,423	-0,113	0,556	-0,848	-0,810	1,000

TABLA 6. Variación del contenido de metales y extractables en la Loza II.

PARA LA BD SUCIA (N=200)			
VARIABLES	Mínimo	Máximo	Prom
Fe	35,110	42,992	40,038
Ni	1,143	1,402	1,290
Al	3,920	5,500	4,553
Mg	1,719	4,970	3,036
Cr	1,443	1,765	1,606
Mn	0,530	0,944	0,754
Si	2,816	6,000	4,231
Co	0,093	0,173	0,120
No. Mineral	0,106	11,282	4,460
Extractable de Ni	69,656	88,057	81,319
Extractable de Co	21,667	75,114	52,978
PARA LA BD LIMPIA INTERMEDIA (N=137)			
VARIABLES	Mínimo	Máximo	Prom
Fe	35,110	42,992	39,843
Ni	1,154	1,402	1,293
Al	3,920	5,390	4,548
Mg	1,719	4,970	3,082
Cr	1,443	1,765	1,603
Mn	0,530	0,906	0,745
Si	2,816	6,000	4,280
Co	0,093	0,173	0,119
No. Mineral	1,686	11,282	4,381
Extractable de Ni	76,560	88,057	82,719
Extractable de Co	38,986	75,114	55,980

TABLA 7. Mejores modelos multivariados para el pronóstico del Ni ext.

MODELO No.	BD LIMPIA INTERMEDIA. LIMPIEZA POR INTERVALOS DE R5							
	Correlación par	101	105	106	181	184	181	184
Intercepción		99,818	102,235	99,401	91,288	89,095		
Fe	0,402	-0,195	-0,212	-0,322				
Ni	-0,065	0,660	0,295	-0,555	-0,013	-0,431		
Al	-0,063		-0,262	0,264		-0,132		
Mg	-0,637	-0,702	-0,691	-0,305	-0,461	-0,633		
Mn	0,466			6,923		3,647		
Si	-0,653	-1,878	-1,903	-1,998				
Cr	0,380							
R16= Fe*Si/Cr	-0,653				-0,053	-0,056		
R19= Al*Si/Mn	-0,594				-0,055			
Coefficiente de correlación múltiple		0,662	0,663	0,679	0,668	0,670		
Coefficiente de determinación R ²		0,439	0,440	0,462	0,447	0,449		
R ² ajustado		0,422	0,418	0,437	0,430	0,428		
Error típico		1,802	1,807	1,778	1,789	1,793		
Observaciones		137	137	137	137	137		
F		25,790	20,546	18,584	26,629	21,316		
Valor crítico de F		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		
EFFECTIVIDAD		99,5%	93,43	93,43	91,97	91,97		
GENERAL		99,0%	95,62	96,35	94,89	92,7		

Ejemplo de escritura del Modelo 101

$$\text{Ni Ext (\%)} = 99,818 - 0,195*(\%Fe) + 0,66*(\%Ni) - 0,704*(\%Mg) - 1,878*(\%Si)$$

TABLA 8. Modelos Multi-variables ajustados por la BD Limpia Final

	MODELO No.	Correlación par	101Fin	105 Fin	106 Fin
	Intercepción		101,180	101,479	98,736
Fe		0,420	-0,263	-0,265	-0,429
Ni		-0,057	1,925	1,875	0,722
Al		-0,031		-0,030	0,629
Mg		-0,680	-1,026	-1,026	-0,449
Mn		0,511			9,185
Si		-0,689	-1,726	-1,729	-1,930
Coeficiente de correlación múltiple			0,706	0,706	0,735
Coeficiente de determinación R ²			0,498	0,498	0,540
R ² ajustado			0,481	0,477	0,518
Error típico			1,621	1,627	1,563
Observaciones			128	128	128
F			30,474	24,182	23,707
Valor crítico de F			0,000	0,000	0,000
EFFECTIVIDAD			99,5%	98,44	96,88
GENERAL			98,44	98,44	98,44

TABLA 9 Comparación entre R5 y No. mineral para diferentes situaciones

MODELO No.	LIMPIEZA POR INTERVALOS DE R5		SITUACIÓN ACTUAL		LIMPIEZA POR No. Mineral
	BD LIMPIA FINAL		BD SUCIA		BD LIMPIA INTERMEDIA
	R5-Fin	No. Mineral-Fin	R5-S	No. Min-S	No. Mineral
Intercepción	75,491	79,113	74,896	77,968	77,766
No. Mineral o R5	1,660	0,805	1,468	0,752	1,064
Coefficiente de correlación múltiple	0,675	0,661	0,393	0,408	0,642
Coefficiente de determinación R ²	0,456	0,436	0,155	0,166	0,412
R ² ajustado	0,451	0,432	0,150	0,162	0,407
Error típico	1,667	1,696	3,083	3,062	2,459
Observaciones	128	128	200	200	125
F	105,454	97,534	36,216	39,509	86,124
Valor crítico de F	0,000	0,000	0,000	0,000	7,383E-16
EFFECTIVIDAD	99,5%	94,53	70	71	85,6
EFFECTIVIDAD	99,0%	97,66	76,5	75,5	91,24

TABLA 10. Resumen de la evolución de los coeficientes para las mejores combinaciones de variables

TIPO DE BASE DE DATOS	Coeficientes de correlación Par				Indicadores estadísticos del análisis de regresión			
	BD Sucia	BD LimpInterm	BD LimpFinal	BD Sucia	BD Limpia-Intermedia	BD Limpia-Final	BD Limpia-Intermedia	BD Limpia-Final
Intercepción				107,701		99,818		101,180
Fe	0,157	0,402	0,420	-0,619		-0,195		-0,263
Ni	0,057	-0,065	-0,057	8,581		0,660		1,925
Mg	-0,408	-0,637	-0,680	-0,472		-0,702		-1,026
Si	-0,417	-0,653	-0,689	-2,658		-1,878		-1,726
Coeficiente de correlación múltiple				0,481		0,662		0,706
Coeficiente de determinación R ²				0,231		0,43 9		0,498
Error típico				2,963		1,802		1,621
Observaciones (N)	200	137	128	200		137		128
EFFECTIVIDAD				74		93,40		98,44
GENERAL				78,5		95,62		98,44
PROTOTIPOS DEL MODELO 8								
TIPO DE BASE DE DATOS	Coeficientes de Correlación Par				Indicadores estadísticos del Análisis de Regresión			
Intercepción				182,855		89,097		147,903
Goethita	0,183	0,422	0,439	-5,050		0,407		-3,780
Serpentina	-0,409	-0,639	-0,684	-0,735		-0,539		-0,546
Asbolana	0,104	0,463	0,509	-5,487		4,803		4,581
Nontronita	-0,246	-0,310	-0,336	-2,606		-0,414		-2,028
Halloysita	-0,051	-0,225	-0,237	-1,204		-0,198		-0,211
Magnetita-Maghemita	0,159	0,402	0,420	21,914		-3,104		16,244
Coef. de correlación múltiple				0,48 1		0,679		0,737
Coef. de determinación R ²				0,231		0,462		0,543
Error típico				2,979		1,778		1,559
Observaciones (N)	200	137	128	200		137		128
EFFECTIVIDAD				71		92,70		97,66
GENERAL				78		94,89		98,44

TABLA 11. Resumen de la evolución de los coeficientes para las mejores combinaciones de variables.

TIPO DE BASE DE DATOS	Coeficientes de Correlación Par			Indicadores estadísticos del Análisis de Regresión		
	BD Sucia	BD LimpInterm	BD LimpFinal	BD Sucia	BD Limpia-Intermedia	BD Limpia-Final
Interecepción				104,500	102,235	101,479
Fe	0,157	0,402	0,420	-0,598	-0,212	-0,265
Ni	0,057	-0,065	-0,057	9,077	0,295	1,875
Al	0,056	-0,063	-0,031	0,344	-0,262	-0,030
Mg	-0,408	-0,637	-0,680	-0,494	-0,691	-1,026
Si	-0,417	-0,653	-0,689	-2,606	-1,903	-1,729
Coeficiente de correlación múltiple				0,482	0,663	0,706
Coeficiente de determinación R ²				0,232	0,440	0,498
Error típico				2,969	1,807	1,627
Observaciones (N)	200	137	128	200	137	128
EFFECTIVIDAD (99,5%)				73	93,40	98,44
GENERAL (99,0%)				79	96,35	98,44
PROTOTIPOS DEL MODELO 105						
	Coeficientes de Correlación Par			Indicadores estadísticos del Análisis de Regresión		
TIPO DE BASE DE DATOS	BD Sucia	BD LimpInterm	BD LimpFinal	BD Sucia	BD Limpia-Intermedia	BD Limpia-Final
Interecepción				79,455	79,556	84,190
Goethita	0,183	0,422	0,439	1,710	1,255	0,975
Gibbsita	0,070	-0,108	-0,091	1,354	0,463	0,809
Serpentina	-0,409	-0,639	-0,684	-0,697	-0,614	-0,667
Halloysita	-0,051	-0,225	-0,237	-1,987	-1,207	-1,586
Magnetita-Maghemita	0,159	0,402	0,420	-10,292	-6,718	-5,735
Coef. de correlación múltiple				0,475	0,663	0,709
Coef. de determinación R ²				0,225	0,440	0,503
Error típico				2,982	1,807	1,618
Observaciones (N)	200	137	128	200	137	128
EFFECTIVIDAD (99,5%)				72	93,40	96,88
GENERAL (99,0%)				80	96,35	98,44
PROTOTIPOS DEL MODELO 2						

TABLA 12. Resumen de la evolución de los coeficientes en los modelos multivariantes integrados

TIPO DE BASE DE DATOS	No. de Mineral. Función Lineal			No. de Mineral. Función Polinómica		
	Indicadores estadísticos de análisis de regresión					
	BD Sucia	BD LimpInterm	BD LimpFinal	BD Sucia	BD Limpia-Intermedia	BD Limpia-Final
Intercepción	77,968	79,240	79,113	76,041	77,039	76,989
No. Mineral	0,752	0,794	0,805	-0,08093x2 + 1,6037x	-0,0893x2 + 1,7552x	-0,0843x2 + 1,721 1x
Coefficiente de correlación múltiple	0,408	0,6 12	0,66 1			
Coefficiente de determinación R^2	0,166	0,374	0,436	0,181	0,408	0,471
R^2 ajustado	0,162	0,370	0,432			
Error típico	3,062	1,881	1,696			
Observaciones (N)	200	137	128	200	137	128
EFFECTIVIDAD (99,5 %)	71	91,24	94,53	72	91,24	95,31
GENERAL (99,0 %)	75,5	93,43	97,66	78	96,35	99,22
Relación R5. Función Lineal						
Indicador del análisis de regresión						
TIPO DE BASE DE DATOS	BD Sucia	BD LimpInterm	BD LimpFinal	BD Sucia	BD Limpia-Intermedia	BD Limpia-Final
Intercepción	74,896	75,599	75,491	71,767	70,795	71,806
Relación Limonita/Serpentina (R5)	1,468	1,652	1,660	-0,1579x2 + 2,9029x	-0,2428x2 + 3,8591x	-0,1848 x2+ 3,346x
Coefficiente de correlación múltiple	0,393	0,632	0,675			
Coefficiente de determinación R^2	0,155	0,399	0,456	0,157	0,410	0,463
R^2 ajustado	0,150	0,394	0,451			
Error típico	3,083	1,844	1,667			
Observaciones (N)	200	137	128	200	137	128
EFFECTIVIDAD (99,5 %)	71,5	91,24	96,09	71	90,5	96,09
GENERAL(99,0 %)	76	94,16	96,88	76,5	96,35	96,88

TABLA 13. Resultado de la efectividad del pronóstico del Ni Ext. al aplicar los mejores modelos finales a las dos BD restantes y la comparación con su modelo correspondiente en la BD Limpia Intermedia.

TIPO DE BASE DE DATOS	MODELO 101-BD Limpia Final			MODELO 2-BD Limpia Final		
	BD Sucia	BD Limpia Intermedia	BD Limpia Final	BD Sucia	BD Limpia Intermedia	BD Limpia Final
Observaciones (N)	200	137	128	200	137	128
EFFECTIVIDAD GENERAL	71 (99,5 %) (99,0 %)	9 1,97 94,89	98,44 98,44	70 76,5	9 1,97 94,89	96,88 98,44
		MODELO 101-BD Limpia Intermedia			MODELO 2-BD Limpia Intermedia	
EFFECTIVIDAD GENERAL		93,40 95,62			93,40 96,35	
		No. de Mineral-Fin. Función Polinómica			R5-Fin. Función Polinómica	
Observaciones (N)	200	137	128	200	137	128
EFFECTIVIDAD GENERAL	71 (99,5 %) (99,0 %)	9 1,24 96,35	95,31 99,22	71 76,5	91,2 94,89	96,09 96,88
		No. de Mineral-Intermedia Función Polinómica			R5-Intermedia Función Polinómica	
EFFECTIVIDAD GENERAL		9 1,24 96,35			90,5 96,35	