

Ministerio de Cultura y Educación Universidad Nacional de San Luis Facultad de Ciencias Físico Matemáticas y Naturales Departamento: Mineria Area: Mineria

(Programa del año 2022)

I - Oferta Académica

| Materia | Carrera | Plan | Año | Período |
|--------------------------------|--------------|------|------|-----------------|
| FUNDAMENTOS DE GEOESTADISTICAS | ING.EN MINAS | 6/15 | 2022 | 2° cuatrimestre |

II - Equipo Docente

| Docente | Función | Cargo | Dedicación |
|------------------------------|----------------------|------------|------------|
| VARGAS, ANTONIO ROLANDO | Prof. Responsable | P.Adj Exc | 40 Hs |
| GIL COSTA, GRACIELA VERONICA | Prof. Colaborador | SEC F EX | 10 Hs |
| BASSAN, JOSE ANTONIO | Prof. Co-Responsable | P.Adj Simp | 10 Hs |
| ROSSI, MARIO EDUARDO | Prof. Co-Responsable | P.Adj Simp | 10 Hs |

III - Características del Curso

| Credito Horario Semanal | | | | |
|-------------------------|----------|-------------------|---------------------------------------|-------|
| Teórico/Práctico | Teóricas | Prácticas de Aula | Práct. de lab/ camp/ Resid/ PIP, etc. | Total |
| 4 Hs | Hs | Hs | Hs | 4 Hs |

| Tipificación | Periodo |
|----------------------------------|-----------------|
| C - Teoria con prácticas de aula | 2° Cuatrimestre |

| Duración | | | | |
|------------|------------|---------------------|-------------------|--|
| Desde | Hasta | Cantidad de Semanas | Cantidad de Horas | |
| 08/08/2022 | 18/11/2022 | 15 | 60 | |

IV - Fundamentación

Asignatura de carácter teórico-práctico, cuya finalidad es entregar a los estudiantes los conceptos generales y básicos de geoestadística utilizados en la industria minera, con énfasis en la Estimación de Recursos Minerales, y breves menciones de otras aplicaciones generales.

Incluye un repaso elemental de Estadística Clásica y de la Teoría de Probabilidades.

Se busca desarrollar en los estudiantes su capacidad de análisis y pensamiento sistémico sobre el rol de la geoestadística y la aplicabilidad de las metodologías de estimación y evaluación de riesgos geológicos y mineros en el proceso minero.

V - Objetivos / Resultados de Aprendizaje

. Conocer y comprender conceptos básicos de Estadística clásica, incluyendo estadística descriptiva, de inferencia, y un conocimiento básico de probabilidades.

- . Conocer las mejores prácticas metodológicas que emplea la industria minera en la aplicación de métodos geoestadísticos.
- . Revisión y entendimiento de los aspectos básicos de la teoría geoestadística, con énfasis en aplicaciones prácticas.
- . Incluir una definición de prácticas buenas, mejoras, y óptimas en el sentido dado por los estándares internacionales utilizados para el cálculo de recursos y reservas mineras. Se enfatiza el grado de esfuerzo requerido y/o preferido para los distintos niveles de detalle según el estado de avance del proyecto minero.
- . Describir someramente los reglamentos Canadienses (43-101) y Australianos (ASZX basado en el JORC). Análisis de los objetivos de cada reglamento. Mención de otros reglamentos vigentes, incluyendo el reglamento Inglés (The Code), Sudafricano, Chileno, e internacional propuesto por CRIRSCO.

- . Entender los requerimientos de un cálculo de recursos y reservas según el 43-101 y JORC. Aspectos técnicos-geoestadísticos fundamentales para el cumplimiento de los reglamentos internacionales para tabular y reportar recursos y reservas.
- . Desarrollar un proyecto de estimación de recursos completo (en conjunto con la cátedra de Exploración y Evaluación de Yacimientos) de principio a fin a lo largo del año lectivo.

VI - Contenidos

MODULO 1: Introducción y Herramientas y Conceptos Estadísticos.

Objetivos y Alcances de curso. Metodología de trabajo.

Elementos de un Modelo de Recursos. Aspectos Críticos. Perspectiva Histórica. Estadística Descriptiva. Teoría de Probabilidades. Cálculo de Probabilidades. Inferencia Estadística. Distribuciones Univariables, Multivariables, y Espaciales. Teorema Central del Límite. Distribuciones Gausianas, Lognormal, y otras. Integración e Inferencia de Datos. Postulado de Bayes. Transformaciones de Datos.

MODULO 2: Variables y Manejo de los Datos

Variables de leyes minerales. Muestras originales y compositación a largo fijo. Aglomeración especial; técnicas de desaglomeración. Valores extremos. Determinación de la densidad in-situ de la roca. Variables geometalúrgicas y geotécnicas. Análisis exploratorio de datos. Introducción al Proyecto Final del Curso. Descripción del Proyecto Minero, y de las tareas involucradas en el cálculo de recursos del proyecto.

MODULO 3: Controles Geológicos, Dominios de Estimación, y Modelos de Bloques Definición de controles geológicos y de mineralización. Elementos básicos de la interpretación y modelamiento geológico.

Visualización. Definición de los Dominios de Estimación. Uso del análisis exploratorios de los datos para la definición de dominios de Estimación. Contactos y tendencias espaciales de leyes de minerales. Importancia y Factores de Riesgo en la definición de los dominios de estimación. Modelo de bloques y geometrías comúnmente utilizadas. Breve descripción de los sistemas de coordenadas que se pueden utilizar.

MODULO 4: Variografía y Continuidad Espacial Descripción de los Conceptos Involucrados. Variogramas Experimentales. Modelos de Variogramas en 3-D. Casos Multivariables.

MODULO 5: Dilución y Selectividad Minera

Recursos In-situ vs. Recursos Recuperables. Tipos de Dilución y Pérdidas de Mineral. Corrección del Efecto de Volumen-Varianza. Efecto de la Información.

VII - Plan de Trabajos Prácticos

MODULO 1: Introducción y Herramientas y Conceptos Estadísticos

MODULO 2: Análisis exploratorio de las muestras originales. Compositado. Análisis estadísticos de los compósitos de estimación.

MODULO 3: Definición de Dominios de Estimación para el Proyecto Final del curso.

MODULO 4: Definición de Modelos de Variogramas para el Proyecto Final del curso.

MODULO 5: Análisis del Efecto Volumen-Varianza para el Proyecto Final del curso.

VIII - Regimen de Aprobación

1) Sistema de regularidad

- . Es obligatoria la asistencia al 80% de las clases.
- . Aprobación de dos evaluaciones parciales con un porcentaje no inferior al 60%. Cada una de ellas tendrá una recuperación.
- . En caso de no aprobar alguna de las evaluaciones parciales, podrá lograr la condición de regular, rindiendo una evaluación general que consiste de los temas evaluados en las dos pruebas.
- . Los estudiantes que hayan obtenido la condición de regular, aprobarán la materia a través de un examen final en las fechas que el calendario académico prevé para esta actividad.
- 2) Sistema de promoción:

La materia se podrá aprobar directamente, sin el examen final, obteniendo calificaciones no inferiores al 70% en cada una de las evaluaciones parciales o en las recuperaciones y aprobando una evaluación integradora oral.

- . El estudiante que aprobó alguna evaluación con menos del 70% (obtuvo entre 60% y menos de 70%), puede presentarse a la correspondiente recuperación para intentar la promoción. La nota que se le considerara será la última obtenida.
- 3) Para estudiantes libres:
- . La aprobación de la materia se obtendrá rindiendo un examen práctico escrito y en caso de aprobar éste, deberá rendir en ese

IX - Bibliografía Básica

- [1] Spiegel, Murray R., Estadística, 2da Edición, McGraw-Hill, 1988
- [2] David, M., Geostatistical Ore Reserve Estimation, Elsevier, Amsterdam, 1977.
- [3] Davis, J.C., Statistical and Data Analysis in Geology, 2da Edición, John Wiley and Sons, New York, 646p, 1986.
- [4] Deutsch, C.V., 2002, Geostatistical Reservoir Modeling, Oxford University Press, New York, 376 p.
- [5] Deutsch, C.V., and Journel, A.G., GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press, New York, 340p., con CD-ROM, 1997.
- [6] Gentry, D.W., y O'Neil, T.J., Mine Investment Análisis, Society of Mining Engineers, New York, 502p, 1984.
- [7] Goovaerts, P., Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Oxford University Press, 483p., 1997.
- [8] Guilbert, J.M., y Park, C.F., Jr., The Geology of Ore Deposits, W.H. Freeman and Co., 985p, 1986.
- [9] Gy, P.M., Sampling of Particulate Materials: Theory and Practice, 2nd. Ed., Elsevier Amsterdam, 1982.
- [10] Hartman, H.L., Sr. Editor, SME Mining Engineering Handbook, Port City Press Inc., Baltimore, 2 vol., 2260p., 1992.
- [11] Isaaks, E.H., y Srivastava, R.M., 1989, An Introduction to Applied Geostatistics, Oxford University Press, 561 p.
- [12] Journel, A.G., y Huijbregts, Ch.J., Mining Geostatistics, Academic Press, 600 p., 1978.
- [13] Kennedy, B.A., Editor, Surface Mining, Segunda Edición, Port City Press Inc., Baltimore, 1194p., 1990.
- [14] Lane, K.F., The Economic Definition of Ore, Mining Journal Books Ltd., London, 149p., 1988.
- [15] Lapin, L.L., Probability and Statistics for Mmodern Engineering, PWS Publ., Boston, 624p, 1983.
- [16] Peters, W.C., Exploration and Mining Geology, 2da Edición, John Wiley and Sons, New York, 685p, 1987.
- [17] Ripley, B.D., Stochastic Simulation, John Wiley and Sons, New York, 237p, 1987.
- [18] Rossi, M.E., y Deutsch, C.V., "Mineral Resource Estimation", ed. Springer, 2014.
- [19] Tukey, J.W., Exploratory Data Análisis, Addison-Wesley Publ. Co., Reading, Mass., 688p., 1977.
- [20] Vogely, W.A., Editor, Economics of the Mineral Industries, 4ta Edición, Society of Mining Engineers, New York, 660p, 1985.

X - Bibliografia Complementaria

- [1] Aguilar C., A.G., y Rossi, M.E., 1996. San Cristóbal: Aplican Método de Maximización de Ganancias, Minería Chilena, Santiago, Chile, 15(175):63-69.
- [2] Amos, Q.G., 1998, Resources and Risk The Lender's View, en "Ore Reserves and Finance: a Joint Seminar between AusIMM and ASX", Sydney, Australia. Junio 15, 1998.
- [3] Baker, C.K., and Giacomo, S.M., Resource and Reserves: Their Uses and Abuses by the Equity Markets, en "Ore Reserves and Finance: a Joint Seminar between AusIMM and ASX", Sydney, Australia, Junio 15, 1998.
- [4] Bruna Novillo, J. & Bassan, J. & Rossi, M.E., "Los Fundamentos del Modelo de Recursos Recuperables". SIMIN 2009. XVI Simposium de Ingeniería en Minas. Santiago, 18-21 Agosto, 2009.
- [5] Código para la Certificación de Prospectos de Exploración, Recursos y Reservas Mineras. Instituto de Ingenieros de Minas de Chile. Ministerio de Minería. Chile. 2003
- [6] Davis, B.M., Some Methods of Producing Interval Estimates for Global and Local Resources, Preprint No. 97-5, Pre-print de la Convención Anual del SME, Denver, CO, Febrero 24-27, 1997.
- [7] Douglas, I.H., Rossi, M.E., y Parker, H.M, Introducing Economics in Grade Control: The Expected Revenue Method, Pre-print de la Convención Anual del SME, Febrero 14-17, Albuquerque, New Mexico, 1994.
- [8] Girardi, J.P., Geoestadística. Fundación Universidad Nacional de San Juan, Argentina. Edición septiembre 2008. (UNSL-Tabla de libros)
- [9] Guibal, D. and Remacre, A., Local Estimation of the Recoverable Reserves: Comparing Various Methods with thReality on a Porphyry Copper Deposi, Geostatistics for Natural Resources characterization, Part 1: 435-448, 1984.
- [10] Isaaks, E. and Davis, B., The Kriging Oxymoron: Conditionally Unbiased and Accurate Prediction, Pre-print de la Convención Anual del SME, Denver, CO, 1999.
- [11] JORC, Código de Australasia para informar sobre Recursos Minerales y Reservas de Mena. AUSIMM. 2012.
- [12] Journel, A.G., Constrained Interpolation and Qualitative Information, Mathematical Geology, 18(3):269-286, 1986.
- [13] Journel, A.G., Non-Parametric Estimation of Spatial Distributions, Mathematical Geology, 15(3):445-468, 1983.
- [14] Krige, D.G. y Assibey-Bonsu, W., Limitations in Accepting Repeated Simulations to Measure the Uncertainties in Recoverable Resource Estimates Particularly for Sections of an Ore Deposit, 6to Congreso Internacional de Geoestadística,

- Ciudad del Cabo, Sud África, 2000.
- [15] Krige, D.G., A Practical Analysis of the Effects of Spatial Structure and Data Available and Used, on Conditional Biases in Ordinary Kriging, 5to Congreso Internacional de Geoestadística, Wollongong, Australia, 1996.
- [16] Krige, D.G., Conditional Bias and Uncertainty of Estimation in Geostatistics, Relator Principal, APCOM'99 International Symposium, Colorado School of Mines, Golden, Octubre 1999.
- [17] Lerchs, H., y Grossman, L., Optimum Design of Open-Pit Mines, Transactions C.I.M., Vol. LXVIII, 17-24, 1965.
- [18] Matheron, G., A Simple Substitute for Conditional Expectation: Disjunctive Kriging, en "Geostat 75", pp. 221-236,1975a.
- [19] Matheron, G., Forecasting Block Grade Distributions: The Transfer Functions, en "Geostat 75", pp. 237-251,1975b.
- [20] Marcotte, D. and David, M., The Bi-Guassian Approach: A Simple Method for Recovery Estimation, Mathematical Geology, 17(6): 625-644, 1985.
- [21] National Instrument 43-101; FORM 43-101F1. Technical Report. Table of Contents. Rules and Policies. Noviembre, 2010.
- [22] Parker, H.M., The Volume-Variance Relationship: A Useful Tool for Mine Planning, en Geostatistics (Mousset-Jones, P., ed.), pp.61-91, McGraw Hill, New Cork, 1980.
- [23] Parker, H.M., Statistical Treatment of Outlier Data in Epithermal Gold Deposit Reserve Estimation, Mathematical Geology, v23, pp. 125-199, 1991.
- [24] Richmond, A.J., Maximum Profitability with Minimum Risk and Effort, 4to Simposio APCOM Regional, Tampere, Finland, 2001.
- [25] Rossi, M.E., Optimising Grade Control: A Detailed Case Study, Proceedings de la 101 Convención Anual del Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia, y Petróleo (CIM), Calgary, Canada, Mayo 2-5, 1999.
- [26] Rossi, M.E., Uncertainty and Risk-Models for Decision-Making Processes, 28vo Simposio Internacional sobre Aplicaciones de Computadores a la Industria Minera (APCOM), Golden, Colorado, USA, Octubre, 1999.
- [27] Rossi, M.E., Improving on the Estimation of Recoverable Reserves, Mining Engineering, January 2000.
- [28] Rossi, M.E., Practical Aspects of Large-Scale Conditional Simulations, 31er Simposio Internacional sobre Aplicaciones de Computadores a la Industria Minera (APCOM), Ciudad del Cabo, Sudáfrica, 2003.
- [29] Rossi, M., Geoestadística Aplicada al Cálculo de Recursos y Reservas. Edición 2008. (UNSL-Tabla de libros)
- [30] Rossi, M.E., and Alvarado C., S.B., Conditional Simulations Applied to Recoverable Reserves, 27mo Simposio Internacional sobre Aplicaciones de Computadores a la Industria Minera (APCOM), Londres, Inglaterra, Abril 19-23, 1998.
- [31] Rossi, M.E., and Camacho V., J., Applications of Geostatistical Conditional Simulations to Assess Resource Classification Schemes, 102da Convención Anual del Instituto Canadiense de Minería, Metalurgia, y Petróleo, (CIM), Quebec City, Canada, Abril 29-Mayo 2, 2001.
- [32] Rossi, M.E., y Parker, H.M., 1993, Estimating Recoverable Reserves, Is It Hopeless?, in Geostatistics for the Next Century (Dimitrakopoulos, R., ed.), pp. 259-276, Kluwer Academic Publ., Boston.
- [33] Rossi, M.E., Parker, H.M., y Roditis, Y.S., Evaluation of Existing Geostatistical Models and New Approaches in Estimating Recoverable Reserves, presentación no publicada en el 24to Simposio Internacional sobre Aplicaciones de Computadores a la Industria Minera (APCOM), Montreal, Canadá, Octubre 1993.
- [34] Rossi, M.E., y Van Brunt, B.H., Optimizing Conditionally Simulated Orebodies with Whittle 4D, Proceedings de la Conferencia "Optimizing with Whittle", Perth, Australia, 8-9 Abril, 1997.
- [35] Srivastava, R.M., Minimum Variance or Maximum Profitability, en CIMM, Vol. 80, no. 901, 63-68, 1987.
- [36] Sullivan, J., Conditional Recovery Estimation through Probability Kriging: Theory and Practice, en Verly, G. et al., editores, "Geostatistics for Natural Resources Characterization", pp. 365-384, 1984.
- [37] Van Brunt, B.H., and Rossi, M.E., "Mine Planning Under Uncertainty Constraints", Proc. of the Optimising With Whittle '99 Conference, March 22-25, 1999, Perth, Australia.
- [38] Verly, G., The MultiGuassian Approach and its Applications to the Estimation of Local Reserves, Mathematical Geology, 15(2):259-286.
- [39] Whittle, J., Beyond Optimization in Open Pit Design, Primera Conferencia Canadiense de Aplicación de las Computadoras a las Industrias Mineras, A.A. Balkema, Rotterdam, p.331-337, 1988.
- [40] Yang, R.L., y Kavetsky, A., A Three Dimensional Model of Muckpile Formation and Grade Boundary Movement in Open Pit Blasting, International Journal of Mining and Geological Engineering, Londres, Chapman y Hall, pp. 13-34, Septiembre 1990.
- [41] Zapata, R., Bassan, J.A., y Bruna, J., "Mineral Control System in Bajo de La Alumbrera Mine, Catamarca, Argentina". Minin2008. III International Conference on Mining Innovation. Santiago, Chile.

XI - Resumen de Objetivos

- . Conocer y comprender conceptos básicos de Estadística clásica.
- . Conocer las mejores prácticas metodológicas que emplea la industria minera en la aplicación de métodos geoestadísticos.
- . Revisión y entendimiento de los aspectos básicos de la teoría geoestadística.
- . Entender los requerimientos de un cálculo de recursos y reservas.
- . Desarrollar un proyecto de estimación de recursos completo.

XII - Resumen del Programa

MODULO 1: Introducción y Herramientas y Conceptos Estadísticos.

Teoría de Probabilidades. Cálculo de Probabilidades. Distribuciones Univariables, Multivariables, y Espaciales. Teorema Central del Límite. Distribuciones Gausianas, Lognormal, y otras. Integración e Inferencia de Datos. Postulado de Bayes. Transformaciones de Datos.

MODULO 2: Variables y Manejo de los Datos

Variables de leyes minerales. Muestras originales y compositación a largo fijo. Valores extremos. Determinación de la densidad in-situ de la roca. Variables geometalúrgicas y geotécnicas. Análisis exploratorio de datos.

MODULO 3: Controles Geológicos, Dominios de Estimación, y Modelos de Bloques

Definición de controles geológicos y de mineralización. Elementos básicos de la interpretación y modelamiento geológico.

Visualización. Definición de los Dominios de Estimación.

MODULO 4: Variografía y Continuidad Espacial

Descripción de los Conceptos Involucrados. Variogramas Experimentales. Modelos de Variogramas en 3-D. Casos Multivariables.

MODULO 5: Dilución y Selectividad Minera

Recursos In-situ vs. Recursos Recuperables. Tipos de Dilución y Pérdidas de Mineral. Corrección del Efecto de Volumen-Varianza. Efecto de la Información.

XIII - Imprevistos

De ocurrir algún imprevisto, se coordinará con los estudiantes las acciones a llevar a cabo a fin de continuar con el normal dictado de la materia.

XIV - Otros