



**INGENIERÍA INDUSTRIAL**  
UNIVERSIDAD DE CHILE



# **CÁTEDRA DE LOGÍSTICA Y PLANIFICACIÓN MINERA**

**Reporte Anual de Actividades  
Abril 2007 – Marzo 2008**

## Objetivos de la Cátedra

La Cátedra en Logística y Planificación Minera radicada en el Departamento de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile y financiada por CODELCO, tiene por objetivo central mantener una relación de largo plazo, en el campo de la investigación aumentando y fortaleciendo la capacidad científica y tecnológica en estos dos temas. La Cátedra busca crear conocimiento y consolidar grupos de investigación a nivel mundial donde participen académicos y profesionales de CODELCO.

Creemos que parte importante del valor de la cátedra radica en la construcción de una red de investigación en que colaboremos con los investigadores de más alto nivel mundial en esta área. Esto permitirá que nuestros investigadores y los profesionales de CODELCO estén en la vanguardia del desarrollo de las herramientas de frontera en nuestro tema y que nuestro grupo, junto a los investigadores de la cátedra del Departamento de Ingeniería de Minas, formemos parte del desarrollo de estos sistemas de frontera y haciéndolos exportables. Una posición de liderazgo en esta red de investigación permite intercambiar desarrollos de punta, e influir en cómo se desarrolla la disciplina.

Entre los objetivos específicos, mencionamos:

- Incentivar la formación de pos grado para que CODELCO se beneficie de una investigación del más alto nivel en logística y planificación minera.
- Cooperación de largo plazo entre la Universidad y CODELCO en temas de mutuo beneficio.
- Fortalecer los equipos humanos y profesionales que se dedican a los temas de logística y planificación en el Departamento de Ingeniería Industrial.

### Directores de la Cátedra de Logística y Planificación Minera CODELCO-DII



**Rafael Epstein**  
Director Departamento  
Ingeniería Industrial



**Andrés Weintraub**  
Académico Departamento  
Ingeniería Industrial

# **Resumen del Programa de Trabajo Ejecutado**

**Abril 2007 – Marzo 2008**

---

## Captación de Buenos Alumnos Tesistas en Temas de Gestión Minera

Se captaron cinco alumnos que han desarrollado o están desarrollando sus tesis en temas relacionados con la logística y planificación minera. Todos ellos pertenecen a un selecto grupo de alumnos de rendimiento destacado y evaluamos estos trabajos al mejor nivel.

- Tema: "Programación Dinámica Estocástica en un problema de Planificación Minera"  
Alumno: Mario Guajardo.  
Profesor guía: Rafael Epstein.
- Tema: "Agregación de un modelo de Planificación Minera de Codelco utilizando Análisis de Clúster a Priori".  
Alumna: Ximena Schultz.  
Profesor guía: Andrés Weintraub.
- Tema: Construcción de un modelo agregado de Extracción Minera para Codelco Chile.  
Alumna: Marianela Pereira.  
Profesor guía: Andrés Weintraub.
- Tema: "Algoritmo de integración para la Planificación Minera a Rajo y Subterránea" ( actualmente en desarrollo)  
Alumno: Felipe Castro.  
Profesor guía: Rafael Epstein.
- Tema: "Simplificación de un Modelo de Planificación Minera con Agregación a Priori y a Posteriori para CODELCO"  
Alumno: Ricardo Vega.  
Profesor guía: Andrés Weintraub.

Los trabajos de tesis han derivado en publicaciones y libros de divulgación científica a nivel internacional.

## Inserción de Investigadores en las Áreas de Logística, Planificación Minera y Afines

**Rene Caldentey**, Ingeniero Civil Industrial de la Universidad de Chile y PhD en Gestión de Operaciones del Massachusetts Institute of Technology (MIT).

El profesor Caldentey es un destacado académico de la Escuela de Negocios de la Universidad de Nueva York (NYU) y es regularmente invitado a dictar cursos y charlas en los más destacados centros académicos a nivel internacional. Su área de investigación se centra principalmente en la planificación con riesgo y en temas de yield management para la industria de servicios.

El profesor Caldentey ha desarrollado modelos de opciones reales para la planificación minera de largo plazo, donde se incorpora la volatilidad del precio del mineral.

Durante el año 2007, René se reincorpora como Académico Jornada Completa del Departamento.

**Daniel Espinoza**, Ingeniero Civil Matemático de la Universidad de Chile y PhD en Ingeniería Industrial y de Sistemas, Georgia Institute of Technology.

Las áreas de interés del profesor Espinoza incluyen Programación Lineal y Entera, Teoría Poliedral y Logística. Ha trabajado en problemas de ruteo de vehículos, problemas de extracción de recursos naturales, problemas de coordinación de flotas y diseño de sistemas de transporte aéreo entre otros.

Actualmente el profesor Espinoza se encuentra trabajando en generar soluciones más flexibles y computacionalmente eficientes para el problema de la determinación de pit final de una mina de rajo, usando técnicas programación combinatorial. La idea es aprovechar las propiedades topológicas del problema para proponer generalizaciones eficientes a los algoritmos disponibles en la literatura.

Durante el año 2006, Daniel se incorpora como Académico Jornada Completa del Departamento.



**René Caldentey**  
Ingeniero Civil Industrial, U. de Chile  
Ph.D. en Gestión de Operaciones, MIT.

**Área de investigación:**  
Extensión de los modelos de planificación incorporando la incertidumbre asociada a la volatilidad de los precios y composición del mineral.



**Daniel Espinoza**  
Ph.D en Ingeniería Industrial y de Sistemas, Georgia Tech University.

**Área de Investigación:**  
Aplicación de técnicas de programación entera al problema de minería de rajo abierto con restricciones de recursos.

**Juan Velásquez**, Ingeniero Civil Electricista e Ingeniero Civil en Computación, Universidad de Chile y PhD en Ingeniería de la Información, Universidad de Tokio.

Las áreas de especialización del profesor Velazquez se desarrollan en torno a la exploración y búsqueda de conocimiento en grandes bases de datos. Estas metodologías se aplican en sectores productivos como la automatización procesos, explotación de recursos naturales, banca y retail. El profesor Velásquez ha concentrado su investigación en la aplicación de técnicas de minería de datos al desarrollo de sitios web inteligentes. Otras áreas de interés del profesor Velazquez incluyen Administración de Bases de Datos y Seguridad Aplicada a Redes de Información.

Juan Velásquez se incorpora al Departamento en 2005.

**Francisco Tubino**, Ingeniero Civil industrial de la Universidad de Chile y MS in Manufacturing System Engineering, University of Wisconsin.

El profesor Tubino es Investigador Asociado del área de Gestión de Operaciones del Departamento de Ingeniería Industrial y se ha especializado en el desarrollo de sistemas eficientes de manufactura.

A fines de 2007 y principios de 2008, el profesor Tubino dirige un estudio para resolver el problema de transporte del personal de la mina Gaby, considerando restricciones legales y de continuidad operacional entre turnos. En este estudio participan estudiantes del Magíster en Gestión de Operaciones del DII, incluyendo alumnos que habían participado en la Cátedra de Logística y Planificación Minera. Este es un excelente ejemplo de cómo las actividades de la cátedra permiten la formación de capital humano en los temas que le son propios.



**Juan Velazquez**  
Ph. D. en Ingeniería de la Información,  
University of Tokyo.

**Área de Investigación:**  
TI Y minería de datos.

**Francisco Tubino**  
MS in Manufacturing System Engineering,  
University of Wisconsin.

**Área de Investigación:**  
Sistemas de manufactura flexible.

## Visitas de Investigadores Destacados

En este periodo tuvimos la visita y colaboración de varios investigadores que colaboraron a dar continuidad a los proyectos de planificación minera en desarrollo, participaron en charlas y seminarios y también en el diseño de proyectos de investigación para extender las metodologías ya desarrolladas.

- Alexandra Newman de Colorado School of Mines. Destacada investigadora con larga trayectoria en temas de planificación minera. Ha participado en diferentes proyectos aplicados de optimización de la industria minera en varios países europeos. El aporte de la profesora Newman ha sido fundamental. Ella se radicó en el DII por 4 meses, participando activamente en cursos, seminarios y proyectos. Ayudó, entre otras cosas, a unir a los Departamentos de Industria y de Minas desarrollando proyectos en conjunto.
- Andreas Bley, del Zuse Institute Berlin (ZIB) ha trabajado en la aplicación de técnicas de optimización con grupos de minería en Australia. En su visita de dos meses iniciamos un proyecto de investigación conjunto en temas de planificación minera.
- Marcel Goic, actualmente haciendo su PhD en Carnegie Mellon, ha trabajado en el diseño e implementación de sistemas de planificación minera de largo plazo para la minería de rajo abierto. En su visita desarrolló el proyecto de continuación para incorporar incertidumbre en la planificación minera.
- Pablo Santibañez, actualmente en Vancouver, Canadá trabajando en temas de planificación y gestión de sistemas de salud, ha trabajado en el diseño e implementación de sistemas de planificación minera de largo plazo para la minería subterránea. En su visita, se reunió con planificadores de la División Andina de Codelco y apoyó a los alumnos que trabajan en los temas de la Cátedra. Esta visita es muy valiosa porque permite dar continuidad a los desarrollos conjuntos Codelco- DII.
- Felipe Caro, Profesor Asistente de la Universidad de California, Los Angeles (UCLA). Ha trabajado en numerosos proyectos de planificación minera y forestal. En su visita trabajó en la preparación del artículo sobre el trabajo de optimización de la planificación minera para ser enviado a una revista líder en el área de Investigación de Operaciones.

En este periodo, vinieron a trabajar en temas mineros los siguientes investigadores:

**Alexandra Newman**  
Colorado School of Mines

**Andreas Bley**  
Zuse Institute of Berlin (ZIB)

**Marcel Goic**  
Carnegie Mellon University

**Pablo Santibañez**  
University of British Columbia

**Felipe Caro**  
University of California, Los Angeles.



Presentaciones de los Profesores Epstein y Newman en APCOM 2007. Sesiones de cursos cortos previos a la conferencia APCOM 2007. Sesión de charlas LAGOS





## Presentación de Trabajos en Congresos de Carácter Nacional e Internacional

Dentro de los objetivos de la Cátedra está el posicionamiento a nivel mundial como un agente relevante en la investigación en temas de logística y planificación minera. La difusión en conferencias y congresos especializados es un elemento fundamental en este objetivo. Durante este periodo, varios de los académicos asociados a la cátedra expusieron los resultados de sus investigaciones en distintas conferencias de nivel internacional.

- **APCOM 2007. 33th International Symposiums on Application Research in the Mineral Industry. Santiago, Chile (Abril 2007).**

*“Long Term Optimization of Investment & and Production Plans in Open - Pit and Underground Copper Mines”*  
Rafael Epstein. Co-Autores: Felipe Caro, Jaime Catalán, Marcel Goic, Pablo Santibañez Andrés Weintraub, Felipe Azocar, Julio Castillo, Sergio Gaete, Hernán Menares.

*“Efficiently Sequencing the Extraction of Ore from an Open-Pit Mine”*  
Alexandra Newman. Co-Autores: Marty Gaupp, Kevin Wood y Enrique Rubio.
- **INFORMS, Annual Meeting. Seattle, USA (Noviembre 2007).**

*“Aggregation Approaches for Mine Planning”*  
Andrés Weintraub. Co-Autores: Marianela Pereira, Ximena Shultz.

*“Long Term Optimization of the Production Chain in Open-pint and Underground Copper Mines”*  
Felipe Caro. Co-Autores: Jaime Catalán, Rafael Epstein, Marcel Goic, Pablo Santibañez, Andrés Weintraub.
- **INFORMS International Meeting, Puerto Rico. (Julio 2007).**

*“Long Term Optimization of the Production Chain in Open-pint and Underground Copper Mines”*  
Felipe Caro; Co-Autores: Jaime Catalán, Rafael Epstein, Marcel Goic, Pablo Santibañez, Andrés Weintraub.
- **Workshop on Rock Mechanics and Logistics in Mining 2007, Santiago, Chile. (Febrero 2007)**

Presentación de trabajos de los profesores Alexandra Newman, Rafael Epstein, Andrés Weintraub y de los alumnos Marianela Pereira y Ximena Schultz.
- **Lagos 2007 IV Latin American Algorithms, Graph and Optimization Symposium. Puerto Varas, Chile (Noviembre 2007).**

*“A priori and posteriori aggregation procedures to reduce model size in MIP mine planning models”*  
Andres Weintraub. Co-Autores: Marianela Pereira, Ximena Schultz.

## Desarrollo de Seminarios y Cursos con Expertos Nacionales e Internacionales

La divulgación de los avances metodológicos en las diversas áreas de gestión y sus posibles aplicaciones a problemas de planificación minera constituye un objetivo importante de la cátedra. Esto comprende tanto talleres de divulgación abiertos como cursos dirigidos a profesionales en tópicos especiales de planificación minera.

Abril, 2007. Charla sobre Planificación Minera para el Instituto Milenio: Sistemas Complejos de Ingeniería.

Expositor : Rafael Epstein.

Descripción : El objetivo de esta charla fue discutir respecto a los desafíos de gestión que plantea la minería y las oportunidades para desarrollar tanto la faceta profesional como de investigación. La audiencia estuvo compuesta por académicos de varias universidades del país (U. de Chile, PUC, Santiago, los Andes, UAI), así como de los alumnos del Magister en Operaciones y en Economía.

Abril, 2007. Optimización de la Planificación Minera.

Expositor : Alexandra Newman

Descripción : Charla cerrada dictada en las oficinas centrales de Codelco discutiendo la aplicación de modelos de optimización a diversos problemas de planificación minera.



**Expositores del Taller en nuevas tendencias en Administración.**

Andres Musalem, Ricardo Montoya, Felipe Caro, Gabriel Weintraub y Marcel Goic

Diciembre, 2007. Taller en Nuevas Tendencias en Administración.

Expositores : Felipe Caro, Gabriel Weintraub, Andrés Musalem, Marcel Goic, Ricardo Montoya.

Descripción : En Diciembre de 2007 se realizó un taller donde investigadores jóvenes asociados al DII expusieron respecto a nuevas tendencias en diversas áreas de gestión. Entre los expositores contamos tanto con investigadores con posiciones de profesor en importantes universidades de USA (Columbia, Duke, UCLA), como con estudiantes de Doctorado en prestigiosas universidades (Columbia y Carnegie Mellon). A este taller se invitó a profesionales de Codelco.

**Abril, 2007. Mine Planning Tools and Latest Developments.**

Expositor : Enrique Rubio (Rafael Epstein dicta el módulo de optimización).

Descripción : En el marco previo al Congreso APCOM 2007, el profesor Enrique Rubio del Departamento Ingeniería de Minas, dictó un breve curso acerca de las nuevas tendencias en planificación minera. El Profesor Epstein dictó el módulo de optimización de la planificación.



**Seminario Profesora Alexandra Newman**

**Marzo, 2007. Optimizing the Transition From Surface to the Underground Mining.**

Expositor : Alexandra Newman.

Descripción : En este seminario abierto a la comunidad universitaria y realizado en el DII, se describe una propuesta metodológica para hacer la transición entre los métodos de explotación de superficie y subterránea.

**Noviembre, 2007. Seminario para Líderes TI del Sector Minero**

Expositor : Juan Velásquez.

Descripción : En este seminario realizado en Iquique, se abordaron diversos temas de relevancia en temas de tecnologías de la información (TI) de relevancia para todo el sector minero, incluyendo Codelco. En este seminario el profesor Velazquez dictó la charla "Automatizando la Web: hacia la personalización de la experiencia del usuario web".

**Programa de Desarrollo Ejecutivo CESCO – CRU.**

Este Programa está dirigido a la alta gerencia de la industria minera y de metales en Latinoamérica. Rafael Epstein, el único expositor nacional, participa presentando el tema "Flexibilidad del Negocio, Administración del Riesgo y Planes de Contingencia." Este seminario estaba originalmente programado para fines de 2007 pero se reprogramó para el 2008. Se anexa folleto de difusión preparado por CRU.

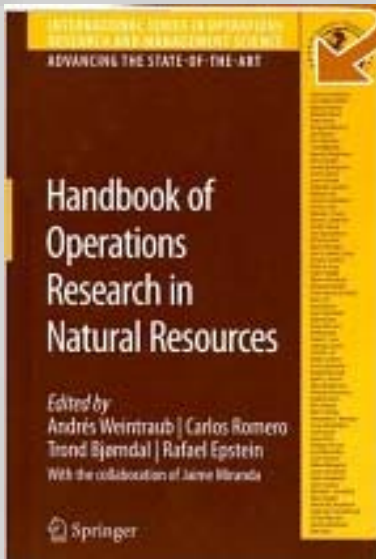
## **Incorporación de Temas de Gestión de Operaciones Mineras en el Programa de Magíster en Gestión de Operaciones y en el Programa de Pregrado de Ingeniería Civil Industrial**

La formación de equipos de investigación en temas de logística y planificación minera requieren motivar a los estudiantes en distintas etapas de su crecimiento profesional. Así, consideramos necesario introducir diversas actividades que permitan enfrentar a los estudiantes con los problemas y desafíos que presenta el proceso de planificación minera. En particular, se han incorporado temas de minería en los cursos de Gestión de Operaciones (para un curso obligatorio de la carrera de Ingeniería Civil Industrial y otro del Magíster en Gestión de Operaciones), usando casos de estudio y tareas que se basan en problemas reales de operaciones mineras:

- Tarea de secuenciamiento de extracción en minería subterránea. Tarea diseñada para el curso de pregrado de Optimización (IN34A). Este curso es de plan común para todas las ingenierías. Es decir, gran parte de los ingenieros de Facultad se ven expuestos a este material. La tarea incluye tanto el modelamiento lógico formal de la función objetivo y de las restricciones a considerar en el problema de secuenciamiento, como una de resolución numérica de una instancia de prueba.
- Caso de Planificación Minera para el curso de Estudio de Casos del magíster en Gestión de Operaciones (IN76K). En este caso los estudiantes reciben una descripción general del proceso de planificación minera de cielo abierto de largo plazo y una descripción de las restricciones operacionales y lógicas que deben ser respetadas en el plan. Junto con la descripción general del problema, los estudiantes reciben un set de datos de una instancia de tamaño real incluyendo leyes y tonelaje en el yacimiento, capacidades de producción y costos de proceso. El caso se centra en la exploración de alternativas de resolución del problema discutiendo las ventajas y desventajas de distintas formulaciones del problema.

## **Incorporación de un Curso Relacionado a Temas de la Cátedra**

Como apoyo a la Cátedra, hemos diseñado un seminario semestral de planificación minera donde se tratarán en profundidad los más recientes avances e innovaciones en logística y planificación minera. La realización de este seminario está programada para los viernes de 14:30 a 16:00 horas durante el segundo semestre de 2008, Este curso estará dirigido por Rafael Epstein, del Departamento de Ingeniería Industrial y Enrique Rubio del Departamento de Ingeniería de Minas.



Presentación del libro "In Handbook Of Operations Research in the Natural Resources". Marzo 2008.



Este año fue lanzado el libro "Handbook of Operation Research in Natural Resources", Editado por Andrés Weintraub, Rafael Epstein, Carlos Romero y Trond Bjorndal. Este libro incluye un sección especial dedicada a aplicaciones en minería.

## Publicaciones de la Cátedra

- Caro, Rodrigo, Rafael Epstein, Pablo Santibañez and Andrés Weintraub, "An Integrated Approach to the Long -Term Planning Process in the Copper Mining Industry." In Handbook Of Operations Research in the Natural Resources, 2007. International Series in Operations Research & Management Science, Springer.
- Weintraub, Andrés, Marianela Pereira and Ximena Schultz, "A priori and a posteriori aggregation procedures to reduce model size in MIP mine planning models". Electronic Notes in Discrete Mathematics, Volume 30, 20 February 2008, Pages 297-302

## Tesis y Memorias

- Guajardo, Mario. "Programación Dinámica Estocástica en un Problema de Planificación Minera". Tesis para optar al título de Ingeniero Civil Industrial y al grado de Magister en Gestión de Operaciones, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile, 2007.
- Ximena Schultz. "Agregación de un Modelo de Planificación Minera de Codelco Utilizando Análisis de Cluster a Priori". Memoria para optar al título de de Ingeniero Civil Industrial, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile, 2007.
- Pereira, Marianela. "Construcción de un Modelo Agregado de Extracción Minera". Memoria para optar al título de de Ingeniero Civil Industrial, Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile, 2007.

## Workshop of Operation Research in Mining

Una de las actividades de mayor relevancia en la que hemos trabajado este año, es la Organización de un Congreso Internacional en temas de Investigación de Operaciones en Minería. Este Congreso se realizará durante 4 días consecutivos y su fecha tentativa es del 9 al 12 de Diciembre de 2008. El programa contempla una jornada exclusiva para Codelco, dos sesiones metodológicas con distintos grados de complejidad técnica y finalmente una jornada de aplicaciones.

El objetivo del congreso es reunir a un grupo selecto de investigadores líderes a nivel global en las áreas de la Cátedra. Este sería el primero en reunir a líderes mundiales en el uso de investigación de operaciones en minería. Es de particular importancia hacerlo en estos momentos, en que se ve que modelos de programación lineal con variables 0-1 están comenzando a reemplazar los sistemas anteriores. Esto es posibilitado por los avances en software y hardware. El diseño y organización de este evento ha estado a cargo de un equipo multidisciplinario que incluye a ejecutivos de Codelco y también académicos de los Departamentos de Ingeniería Industrial y de Ingeniería de Minas. El Comité de Programa está integrado por los profesores Rafael Epstein, Mauricio Larrain, Alejandra Newman, Enrique Rubio y Andrés Weintraub.

A la fecha tenemos confirmada la participación de los siguientes expertos internacionales:

- Doreen Thomas. University of Melbourne, Australia.
- Louis Caccetta. Curtin University Of Technology, Australia.
- Marcus Brazil. University of Melbourne, Australia.
- Mark Kuchta. Colorado School of Mines, Estados Unidos.
- Kadri Dagdelen. Colorado School of Mines, Estados Unidos.
- Kevin Wood. Naval Postgraduate School, Estados Unidos.
- Alexandra Newman. Colorado School of Mines, Estados Unidos.
- Andres Weintraub. Universidad de Chile, Chile.
- Rafael Epstein. Universidad de Chile, Chile.
- Enrique Rubio. Universidad de Chile, Chile.

Adicionalmente, estamos en conversaciones para incluir a los siguientes expertos:

- Erkan Topal. University of Queensland, Australia.
- Junior Whittle. Whittle Consulting, Australia.
- Hyam Rubinstein. University of Melbourne, Australia
- Martin Smith. AMC Consultores, Australia.
- Morteza Osanloo. Amirkabir University of Technology, Iran.



Doreen Thomas



Mark Kuchta



Kadri Dagdelen



Louis Caccetta



Enrique Rubio

## Proyectos de Investigación

### **Proyecto Fondef D03I 1064: Metodología para Evaluar Inversión en Proyectos Mineros de Cobre de Largo Plazo.**

Director: Rafael Epstein

Este proyecto consiste en incorporar la volatilidad en el precio del cobre para confeccionar planes mineros de largo plazo que sean robustos ante las variaciones en el precio del mineral. En lo esencial, se buscan políticas de inversión y operación que sean reactivas a las condiciones del mercado y que plantean opciones ante distintos escenarios que enfrenta la empresa.

---

### **Proyecto Fondecyt 1060807: Modelos Combinatoriales y Estocásticos en Planificación Forestal y Minera**

Director: Andrés Weintraub

Se propone desarrollar algoritmos que permitan resolver en forma eficiente problemas de planificación minera. Estos métodos se utilizarán en posteriores modelos de planificación minera estocástica, donde necesitamos resolver múltiples instancias, luego el tiempo de resolución de cada instancia es clave para resolver en un tiempo prudente el problema completo.

---

### **Instituto Milenio: Sistemas Complejos de Ingeniería**

Director: Andrés Weintraub

Los Institutos Milenios son una iniciativa de gran envergadura para apoyar la investigación en Chile. Estos institutos se proyectan a 10 años y financian el funcionamiento de grupos de investigadores de alto nivel. El año 2007, un grupo de investigadores de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, liderados por el Departamento de Ingeniería Industrial, se adjudican un Instituto Milenio en Sistemas Complejos de Ingeniería. Además se incorporan académicos de otras universidades como la PUC, Santiago y los Andes. Este Instituto Milenio abre una línea de investigación en Minería, donde destacan los temas de Planificación Minera y también en Mecánica de Rocas. Los académicos a cargo de esta línea de investigación son Andrés Weintraub, Rafael Epstein, Juan Pablo Montero, Raúl Manasevich, Alejandro Jofré y Felipe Álvarez.

---