

LABORATORIO DE INVESTIGACIONES APLICADAS CON TECNOLOGÍAS ATÓMICAS Y NUCLEARES

Correa, R., Cancino, S., Miranda, P., Wachter, J., Miranda, E., Camilla, S.

Departamento de Física,
Facultad de Ciencias Naturales, Matemática y del Medio Ambiente,
Universidad Tecnológica Metropolitana, Chile

RESUMEN

Considerando la relevancia e impacto de las aplicaciones de las ciencias atómicas y nucleares en diversas áreas de la sociedad es un deber ineludible el pensar en su desarrollo tanto en el ámbito de las tecnologías adecuadas y en el campo de formación y capacitación del recurso humano respectivo. En esta línea, las instituciones de educación superior están llamadas a cumplir un rol fundamental, tanto en lo que se refiere a la investigación como a las aplicaciones de las tecnologías nucleares en diversos campos. Por ello, la Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile imparte desde hace algunos años Programas de Diploma y Magíster en Tecnología Nuclear, lo que sirve de estímulo al desarrollo de la investigación y transferencia de conocimientos en esta área. Esta actividad académica ha derivado en la necesidad de fortalecer los recursos tecnológicos, la infraestructura y la colaboración con otras instituciones afines. Por ende, nuestra Universidad ha adoptado la decisión de constituir un Laboratorio de Investigaciones Aplicadas con Tecnologías Atómicas y Nucleares (LIATAN), cuyos componentes esenciales son: acelerador electrostático Van de Graaff con energías variables entre 0.3 y 3.5 MeV, acelerador lineal de electrones – LINAC con energía variables hasta 18 MeV, unidad de análisis con fluorescencia de rayos X – XRF, laboratorio de espectroscopía gamma, estación móvil de monitoreo ambiental y sección de modelamiento con sistemas computacionales avanzados. El Laboratorio tiene por objeto fomentar y desarrollar una actividad científica compleja, y en esta línea, está abierto a impulsar y facilitar la colaboración y participación de otras instituciones relacionadas. Un rol importante lo constituyen los convenios de colaboración que hemos establecido con la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), con la Universidad de Chile y con el Instituto Nacional del Cáncer (INC) en Chile. El LIATAN debe ser una institución que estimule la colaboración tanto a nivel nacional e internacional y en particular con los países de América Latina.

1. INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se plantean las principales líneas académicas de desarrollo en el ámbito de la investigación, la docencia y la vinculación con el medio en el campo de aplicaciones de tecnologías atómicas y nucleares que se implementan en la Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile. Nuestra institución desarrolla esta actividad desde más de quince años y ha tenido un crecimiento sostenido en el área lo que se verifica en resultados demostrables. Las principales acciones se orientan a investigaciones ambientales relacionadas con estudios de suelos y aerosoles como de sustancias orgánicas, utilizando metodologías experimentales como las emisiones X inducidas por protones (PIXE) [1,2,3], estudios de espectrometría gamma y uso de herramientas computacionales avanzadas incluidos sistemas inteligentes diseñados para el análisis espectral. En este marco se desarrolla la implementación de un Laboratorio de Investigaciones Aplicadas con Tecnologías Atómicas y Nucleares (LIATAN) cuyos componentes principales son:

- Acelerador lineal Van de Graaff
- Acelerador lineal de electrones tipo Variant
- Sistema de espectrometría gamma
- Unidad móvil de monitoreo de aerosoles
- Sistema de simulaciones con computación avanzada e inteligencia artificial.

En el presente trabajo se analizan líneas de investigación relacionadas con la actividad del LIATAN, y también, los programas de capacitación y postgrado asociado a estos temas: Diploma y Magíster en Tecnología Nuclear

2. LINEAS DE INVESTIGACIÓN

2.1. Análisis de Muestras Orgánicas y Aerosoles con Metodología PIXE

La metodología del análisis PIXE (particle induced X ray emission) es poderosa, no destructiva y relativamente simple que puede ser usada para indentificar y cuantificar elementos traza que típicamente van del Al (Alumino) al U (Uranio) (Johansson et.al., 1995). En la metodología por análisis PIXE se miden los rayos X que provienen del llenado de vacancias de capas internas de átomos que han sido excitados en la muestra extrallendo un electrón, por medio de un bombardeo con partículas cargadas. Las energías de estos rayos X son característicos para cada elemento, lo que permite una cuantificación. Esta metodología se impelmentó en el análisis de muestras de sustancias orgánicas y aerosols [4,5]

La excitación de los átomos en la muestra se produce incidiendo sobre ellos con una haz de partículas generado por el acelerador Van de Graaff KN 3750 de 3.7 MeV de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile. Este acelerador permite generar los haces iónicos H⁺, D⁺, He⁺, Ne⁺, Ar⁺ y Xe⁺ siendo el haz de H⁺ el utilizado preferentemente para el análisis PIXE.

En el montaje experimental un monitor de perfil del haz NEC modelo FP3 y un conjunto de direccionadores (ver Figura 1 y 2) y colimadores permiten el control y monitoreo del haz a lo largo de la línea. Los blancos son adjuntados al soporte de blancos controlado por computador y es irradiado con un haz de protones de 2.0 MeV de 3 mm² de sección eficaz. El haz después de pasar a través del blanco, es detenido por un copo de Faraday localizado a 0.5 m detrás de la posición del blanco. Corrientes típicas del haz de protones estan entre 5 nA y 20 nA. Los rayos-X emitidos por las muestras son recogidos por un detector de Si(Li) criogénico CANBERRA modelo 7300 que tiene una resolución de 220 ev FWHM a 5.9 keV. Los pulsos son analizados con circuitería electrónica apropiada y colectadas por un Analizador Multicanal ORTEC modelo Trump-8K. El espectro de PIXE almacenado, conteniendo los rayos X característicos más un fondo de tipo Bremsstrahlung son analizados con los programas Axil (Van Espen et.al., 1986) y Gupix (Campbell et al. 2000) obteniendo el área neta de todos los elementos detectados en la muestra. Para verificar la homogeneidad de las concentraciones en la muestra, varios espectros son usualmente analizados en diferentes lugares de cada blanco. Siguiendo la metodología estandar de PIXE las concentraciones elementales son calculadas a partir de las intensidades de los rayos-X, carga acumulada y densidad de masa de las muestras. La sentividad del sistema de detección es determinada por la irradiación, bajo similares condiciones, de un set de muestras certificadas provistas por Micromatter. Muestras certificadas de Al, SiO, CuS, KCl, CaF2, Cr, Fe, ZnTe y CdSe se utilizan para obtener la curva de eficiencia del sistema expresada por unidades de carga y por unidad de densidad de masa superficial en la región de interés en energía, es decir 2-10 keV. La función que ajusta esta curva de eficiencia se obtiene de las muestras estándares a través de la ecuación:

$$I_i = J(E_{k_i}^i) = \frac{I_{st}^i(E_{k_i}^i)}{Q^i m_{st}^i} \quad (2)$$

donde I_{st}^i representa el número de cuentas en el peak K_{α} . Q^i es la carga colectada en el copa de Faraday y m es la masa por unidad de área. Una típica función de ajuste de sensibilidad con estándares pertenecientes al laboratorio se muestra en la Figura 8 como ejemplo.

La concentración de un elemento Z , C_Z , definido como el cuociente entre la masa elemental y la masa total de la muestra, fue calculada usando la ecuación:

$$C_Z = \frac{I_Z(E_{K_{\alpha}})}{M Q J(E_{K_{\alpha}})} \quad (3)$$

donde I_Z , Q y M tienen los mismos significados anteriores pero ahora en referencia a las muestras en estudio y no estándares.

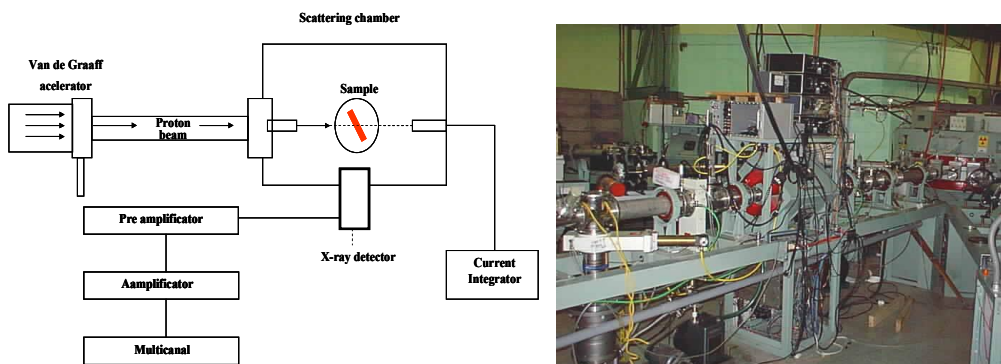


Figura 1. Esquema experimental de trabajo con acelerador Van de Graaff

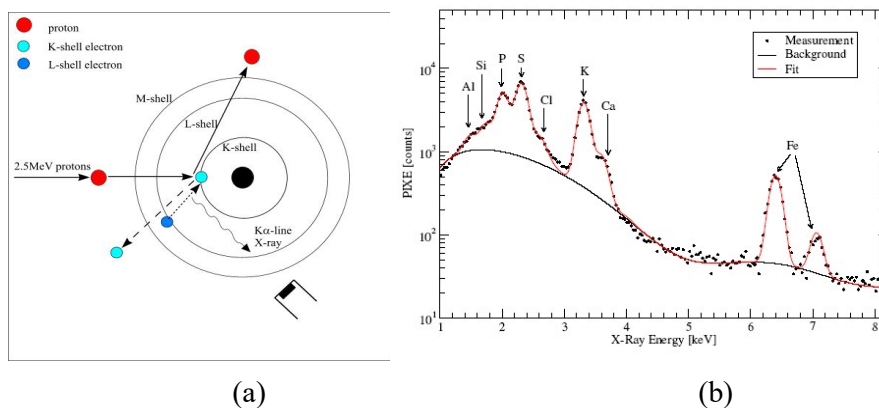


Figura 2 (a) Emisión X en interacción protón-muestra. (b) Espectro PIXE obtenido en muestra de aerosol.

2.2. Estudio de Radiactividad en Suelos.

El Departamento de Física de la UTEM ha diseñado una metodología de monitoreo de presencia de sustancias radiactivas naturales y artificiales, presentes en suelos rurales y urbanos. El objetivo del presente estudio se relaciona con el hecho de que el análisis de la radiactividad ambiental no se realiza en forma sistemática en Chile, existiendo trabajos

importantes al respecto pero en forma esporádica. La implementación de este trabajo se realiza en colaboración con instituciones nacionales interesadas en el tema, como es la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CHEN). Las mediciones realizadas datan desde hace seis años y han comprendido el estudio de muestras recopiladas en la zona del Cajón del Maipo ubicado en la precordillerana de la Región Metropolitana de Chile [6]. Y análisis de muestras volcánicas obtenidas con antelación por el Centro de Física Experimental de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Chile. El procedimiento implementado consiste en determinar los lugares de recopilación de las muestras según situación geográfica y climatológica de la región a estudiar y se ha elaborado un protocolo para la fabricación de las muestras, y, se han calibrado y puesta a punto del sistema de detección de radiación gamma para la obtención de los espectros y su posterior análisis. En el procedimiento experimental se utiliza un detector HP Ge(li) (Figura 3a). La metodología implementada y los resultados espectrales obtenidos (Figura 3b) de las mediciones son difundidas a nivele nacional e internacional. El diseño implementado es importante ya que se puede aplicado en el análisis de muestras provenientes de otras regiones del país.

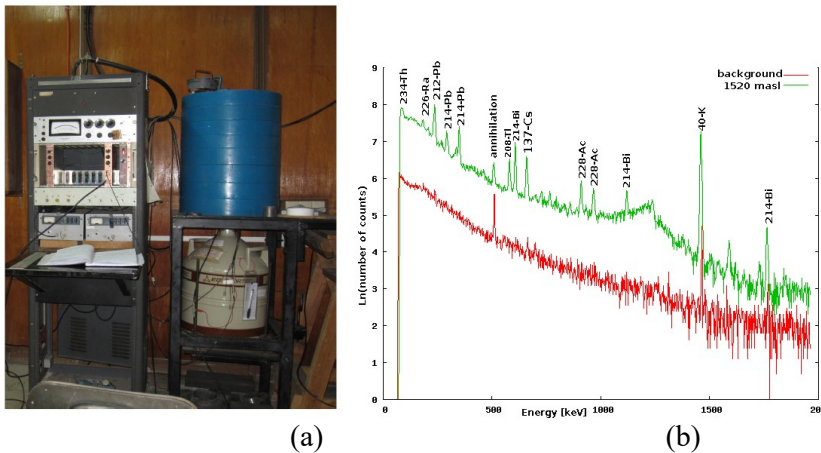


Figura 3 (a) Detector HP Ge(li). (b) Espectro gamma obtenido en análisis de muestra de suelo.

2.3. Diseño de Sistemas Neuronales Artificiales para el Análisis Espectral

En el Departamento de Física de la UTEM se implementa el estudio de aplicaciones de RNA al análisis espectral y en particular en la determinación de concentraciones elementales de espectros PIXE obtenidos de muestras orgánicas (Correa et.al. 2006) y de aerosoles atmosféricos (Dinator et.al. 2007)[7].

Las redes neuronales deben comprenderse como dispositivos de la ingeniería que se construyen inspiradas en funciones del cerebro humano y que son capaces de realizar alguna función relacionada con el aprendizaje, representación del conocimiento y generalización de lo aprendido. Las RNA se aplican para la solución de problemas que presentan alta no linealidad, donde las metodologías algorítmicas y secuenciales demandan mayor tiempo y resultan ser más costosas. En esta línea, las RNA constituyen una metodología computacional que permite avanzar en la automatización de solución de problemas complejos.

En el diseño de una RN existen tres instantes fundamentales orientados a resolver determinado problema y consisten que en primera instancia debe definirse la topología de la red a utilizar, luego determinar el tipo de entrenamiento y finalmente implementar un mecanismo de test o verificación de la RNA entrenada.

Para la determinación de concentraciones elementales en espectros PIXE con RNA se emplearon redes de propagación hacia adelante (FF.NN.) entrenadas con el algoritmo de retro propagación del error, el cual es utilizado en forma frecuente en este tipo de redes. Este algoritmo contempla un entrenamiento supervisado, o con maestro, donde el conjunto de entrenamiento se conforma por pares etiquetados (entrada; salida) y mediante un proceso computacional de cotejo iterativo se produce una corrección del error entre el valor de la salida esperada y la respuesta que entrega la red. Este proceso se repite hasta que el valor de una función objetivo, que en este caso constituye el error cuadrático medio, alcance un mínimo que indica que la red logra el nivel de aprendizaje suficiente, o esperado.

Las estructura de la FF.NN. empleadas en nuestras aplicaciones se componen de tres capas una de entrada(con x_i neuronas), una oculta (con h_L neuronas) y una de salida (con n_o neurona) (Figura 10). El conjunto (x_i, h_L, n_o) se define en relación al problema que se está resolviendo y considerando el número total de ejemplos disponibles tanto para el entrenamiento como para el test, en nuestras aplicaciones en estudio de espectros PIXE se consideró ($i = 5, L = 5, n_o = 1$).

En el proceso de entrenamiento se determinan los valores de las conexiones (pesos) entre las neuronas de una capa con las de la capa siguiente, y estos valores se recuperan cuando la red debe entregar respuesta ante ejemplos diferentes a los utilizados en el conjunto de entrenamiento.

En la Figura 4 se ilustra la relación de las entradas a las RNAs con diferentes momentos del procedimiento experimental PIXE, y como se puede ver, solo una entrada constituye un dato espectral directo y las otras son antecedentes experimentales disponibles antes de conocer el espectro. Es decir la RNA entrenada debe identificar los elementos de interés en el espectro y obtener el número de cuentas bajo la respectiva línea y luego determinar las concentraciones elementales en línea y tiempo real.

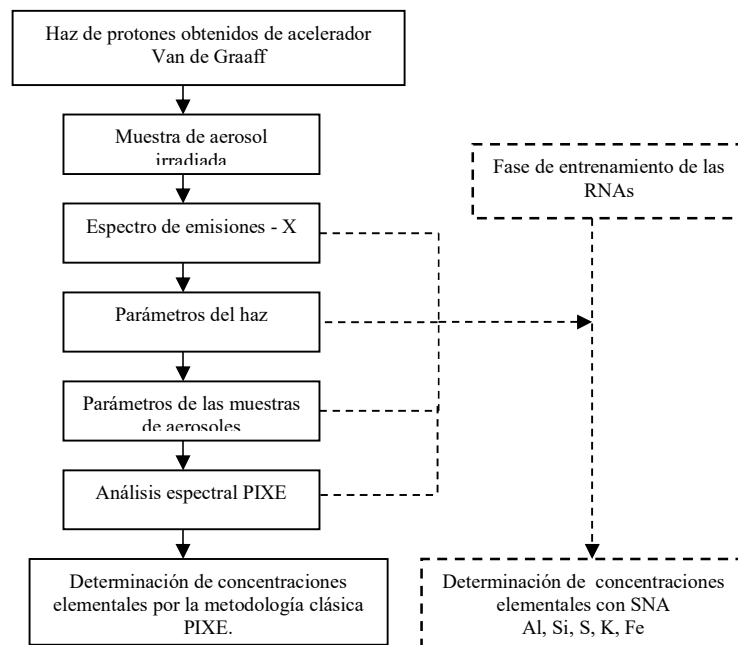


Figura 4. Esquema de procedimiento experimental y su relación con las RNAs para determinar las concentraciones de los elementos investigados muestras de aerosoles.

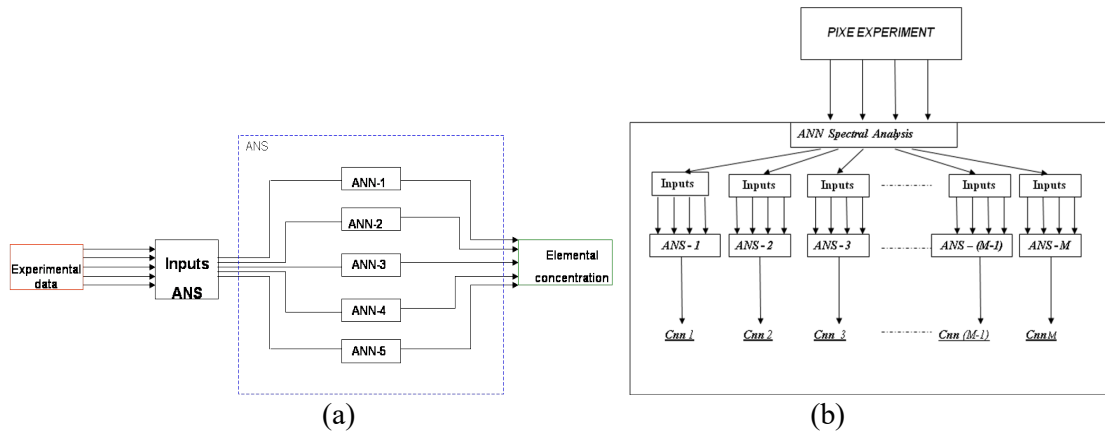


Figura 5 (a) Diseño de SNA para determinar concentración de cada elemento. (b) Esquema de SNAs que operan en paralelo para determinación de concentraciones elementales de interés.

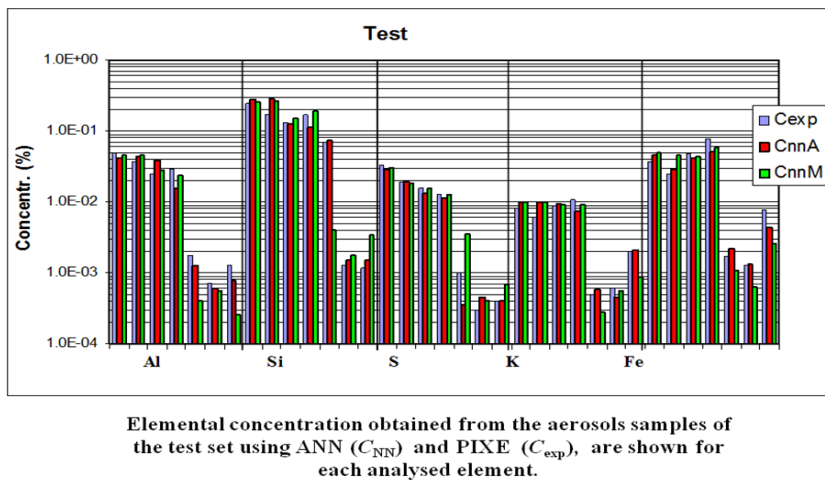


Figura 6 Gráfico comparativo de resultados experimentales y los obtenidos por los SNAs para el conjunto de test.

Con el objeto de mejorar los resultados obtenidos por las RNA se diseñaron sistemas neuronales artificiales (SNA) (Figura 5) que están constituidos por un número determinado de redes (en nuestro caso 5) que operan en paralelo y que han sido entrenadas en forma independiente. El SNA obtiene las respuestas de cada red y las combina mediante algún procedimiento establecido en un sistema de decisión y entrega su respuesta a la consulta realizada. En los experimentos con aerosoles se construyó un SNA para cada elemento de interés y cada sistema opera en paralelo y en forma independiente. En la Figura 6 se presenta un gráfico comparativo de resultados experimentales y aquellos obtenidos por los sistemas neuronales para el conjunto de test.

3. POSTGRADO EN TECNOLOGÍAS ATÓMICAS Y NUCLEARES

De acorde a las líneas de investigación y considerando la necesaria demanda para el desarrollo de recursos humanos altamente calificado en el ámbito de las aplicaciones nucleares en diversos ámbitos a nivel de país y de la región, es que la Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile (UTEM) decide impartir programas de capacitación y posgrado en tecnología nuclear. De esta forma se desarrolla a partir del Año 2011 el Diplomado y el Magíster en Tecnología Nuclear. El objetivo del Programa de Magíster, donde el Diploma constituye una salida intermedia, es entregar una formación técnica en el ámbito del uso de la Tecnología Nuclear a profesionales relacionados con actividades que requieran tanto de la aplicación de ésta tecnología como de la manipulación de material radiactivo aplicadas a diversas áreas como: salud, minería, industria alimentaria, agricultura, construcción, medio ambiente, energía, y otras.

Año I	Año II
<ol style="list-style-type: none">1. Interacción de la Radiación con la materia2. Radiación: Magnitudes y Unidades Radiológicas3. Laboratorio de Física Atómica I4. Física de Reactores Nucleares5. Dosimetría y Daños de la Radiación6. Laboratorio de Física Atómica II7. Tecnología de Radioisótopos y sus Aplicaciones8. Laboratorio de Física Nuclear9. Técnicas de Operación de Material Radioactivo10. Tecnología Nuclear y sus Aplicaciones11. Reactor Nuclear Experimental12. Sistemas de Detección de Radiación Nuclear13. Seminario de Diploma	<ol style="list-style-type: none">1.- Física nuclear. Estructura y Modelos nucleares.2.- Reacciones Nucleares. Tipos de reacciones. Procesos de fisión y fusión nuclear.3.- Proceso del combustible nuclear. Minería del combustible nuclear.4.- Reactores nucleares de potencia. Tipos, fundamentos y aplicaciones.5.- Energía Nuclear de potencia. Centrales nucleares: fundamentos e ingeniería de centrales nucleares.6.- Economía y Gestión de procesos en recursos y tecnologías nucleares.7.- Aplicaciones Nucleares: Salud, industria alimentaria, minería, educación y medio ambiente.8.- Energía Nuclear de potencia. Aplicaciones por regiones y países. Ventajas comparativas, medio ambiente y perspectivas de desarrollo.9.- Seminario de Título10.- Trabajo de Tesis

Figura 7. Asignaturas impartidas en el Programa de Magíster en Tecnología Nuclear de la UTEM.

En coherencia con los objetivos del Programa el egresado de este debe ser un profesional con conocimientos teóricos y prácticos avanzados en la aplicación de técnicas nucleares en áreas específicas del quehacer nacional y con capacidad de manipulación correcta de fuentes radiactivas. Y por ende el Magíster está orientado a profesionales egresados de carreras científicas y técnico profesionales, tales como ingenieros, profesionales de la salud, licenciados en ciencias, educación, etc. En general, el Programa se orienta a que los profesionales adquiera conocimientos, competencias y habilidades técnicas que le permiten al egresado ampliar sus posibilidades y fortalecer sus capacidades ocupacionales en su medio laboral específico.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ilustra el trabajo complejo en torno a la tecnología nuclear y sus aplicaciones que se implementa en el ámbito del área atómica y nuclear en diversas actividades del quehacer socio económico, y que se lleva a cabo en el Departamento de Física de la Universidad Tecnológica Metropolitana de Chile, y que uno de los hitos importantes de esta línea académica es la puesta en marcha del Laboratorio de Investigaciones Aplicadas con Tecnologías Atómicas y Nucleares. Este Laboratorio es una herramienta importante para el desarrollo en la investigación, capacitación de recursos humanos, postgrado y transferencia tecnológica para el país y la región en su conjunto.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Johansson, S.A.E., Campbell J.L., 1988. *PIXE: A Novel Technique for Elemental Analysis*. John Wiley and Sons,
2. J.R. Morales. M. I. Dinator. *J. Radioanalytical Nuclear Chemistry*. **140** (1) 133-139 (1990)
3. J.R. Morales. M.I. Dinator, F. Lloma, J. Saavedra, F. Fallabella. *J. Radio-analytical Nuclear Chemistry*. **187** (1) 79-89 (1994)
4. P.A. Miranda, M.A. Chesta, S.A. Cancino, J.R. Morales, M.I. Dinator, J.A. Wachter, C. Tenreiro. *Nuclear Instruments and Method in Physics Research B*, **248** (2006) 150-154
5. Correa, R., Chesta, M.A, Morales, J.R., Dinator, M.I., Requena I., Vila, I., 2006.. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **Volume 248**, Issue 2, pp. 324-328
6. R. Correa, J. R. Morales, L. Da Silva, S. Donoso, S. Godoy and E. Mera: *AIP Conf. Proc.* **1423**, 369 (2012).
7. Correa, R., Dinator, M.I., Morales, J.R., Miranda, P.A., Cancino, S.A., Vila, I., I. Requena, 2008 *International Journal of PIXE*, **Volume 18**, Issue 3/4, 147-155.