

Convocatoria de ayudas de Proyectos de Investigación

MEMORIA TÉCNICA

1. RESUMEN DE LA PROPUESTA

INVESTIGADOR PRINCIPAL: Francisco Javier Díez Vegas

TÍTULO DEL PROYECTO: Redes de Análisis de Decisiones: un nuevo modelo gráfico probabilista para sistemas inteligentes de ayuda a la decisión. Representación, algoritmos y aplicaciones.

RESUMEN (debe ser breve y preciso, exponiendo sólo los aspectos más relevantes y los objetivos propuestos):

Los modelos gráficos probabilistas (MGPs), en particular las redes bayesianas y los diagramas de influencia (DI), fueron desarrollados en la década de los 80 por investigadores de la inteligencia artificial, las matemáticas y la economía con el fin de abordar problemas cuya complejidad excedía la capacidad de los métodos disponibles hasta ese momento. Hoy en día los MGPs se aplican en numerosas áreas y existe un gran interés por ellos tanto en el campo académico como en el mundo empresarial.

A pesar de ello, los DI aún presentan serios problemas para abordar problemas de decisión muy asimétricos (por ejemplo, cuando el valor de una variable sólo se conoce cuando se ha realizado un test) y con decisiones no ordenadas. Por ello, este proyecto tiene como objetivo desarrollar un nuevo MGP, las **redes de análisis de decisiones** (RAD), que son muy similares a los diagramas de influencia y comparten todas las ventajas de ellos, pero sin las limitaciones mencionadas. Las cuestiones principales que vamos a abordar son la representación del conocimiento y el desarrollo de algoritmos para la evaluación, explicación del razonamiento, análisis de sensibilidad y análisis de coste-efectividad mediante RAD. Estos métodos serán implementados en Elvira, un programa de software libre desarrollado por varias universidades españolas, incluida la UNED.

Este proyecto pretende aplicar las RAD en dos áreas de gran interés social: la construcción de sistemas de ayuda a la decisión en medicina y el análisis del riesgo de crédito en entidades financieras.

2. INTRODUCCIÓN

(máximo cinco páginas)

- Deben tratarse aquí: la finalidad del proyecto; los antecedentes y estado actual de los conocimientos científico-técnicos, incluyendo la bibliografía más relevante; los grupos nacionales o internacionales que trabajan en la misma materia específica del proyecto, o en materias afines.

2.1. Finalidad del proyecto

El objetivo de este proyecto es desarrollar un nuevo tipo de modelo gráfico probabilista (MGP) que pueda ser utilizado en el análisis de decisiones y en la construcción de sistemas inteligentes de ayuda a la decisión. La motivación surge de nuestra experiencia en la construcción de un modelo de decisión para un problema médico, el diagnóstico del cáncer de pulmón mediante distintas pruebas de laboratorio. El método utilizado habitualmente en inteligencia artificial para abordar este tipo de problemas son los diagramas de influencia (DI), un tipo de MGP que contiene tres tipos de nodos: variables aleatorias, decisiones y utilidades. Sin embargo, los DI exigen, por definición, que exista un orden total entre las decisiones, y por eso no son aplicables en muchos problemas como el mencionado, en que el objetivo es no sólo determinar qué pruebas deben realizarse, sino también en qué orden.

Ello nos ha llevado a proponer las **redes de análisis de decisiones (RAD)** como nuevo MGP que, a semejanza de los DI, contienen variables aleatorias, decisiones y utilidades, pero no requieren un orden total entre las decisiones: puede haber un orden parcial o incluso ausencia total de orden entre ellas. Otra ventaja de nuestro modelo frente a los DI es que no necesita añadir estados artificiosos con el fin de convertir en simétricos los problemas de decisión asimétricos, sino que trata las asimetrías de forma natural, al menos, las relativas al hecho de que la decisión de realizar un test permite conocer el valor de la variable aleatoria asociada. (En las RAD este hecho se representa mediante un “arco de revelación” entre ambos nodos.)

Aunque ya hemos definido las propiedades básicas de las RAD para problemas sencillos, en el proyecto que ahora presentamos tenemos previsto resolver la representación de problemas más complejos, en particular, aquellos que implican un razonamiento temporal explícito. También es necesario desarrollar algoritmos eficientes para casos particulares, dado que el problema general tiene complejidad exponencial.

Por otro lado, tenemos previsto desarrollar aplicaciones en dos campos: la medicina y la economía. En el primero de ellos, continuaremos estudiando el mencionado problema del diagnóstico de cáncer de pulmón, que es el que nos ha llevado a proponer las RAD, y utilizaremos este nuevo tipo de modelos para abordar otros problemas, como el cribado de cáncer en pacientes con tromboembolismo venoso y la priorización de pacientes en listas de espera de cirugía de cataratas. Como aplicación en economía, vamos a construir una RAD para el análisis del riesgo de crédito en entidades financieras.

Habrà, por tanto, una realimentación entre las dos vertientes del proyecto: la investigación básica y la aplicada. En primer lugar, el nuevo modelo desarrollado en este proyecto nos servirá para abordar problemas que no podrían ser resueltos mediante las técnicas existentes hasta la fecha. Recíprocamente, el intentar resolver diferentes problemas del mundo real nos planteará nuevos retos en cuanto a la representación del conocimiento y el diseño de algoritmos eficientes, lo cual garantizará, por un lado, que los axiomas de nuestro modelo sean realistas y suficientemente flexibles como para ser aplicados a otros muchos problemas y, por otro, que los algoritmos sean capaces de obtener en un tiempo razonable las utilidades esperadas y las políticas de actuación.

2.2. Antecedentes y estado actual de los conocimientos

a) Modelos gráficos probabilistas (MGPs)

Las redes bayesianas surgieron a principios de la década de los 80 en la Universidad de California-Los Ángeles (UCLA), en el grupo del Prof. Judea Pearl, como modelo gráfico para la construcción de sistemas expertos probabilistas en inteligencia artificial [Pearl, 1988]. Casi simultáneamente, Howard y Matheson [1984], dos economistas del *Stanford Research Institute* (SRI), propusieron los diagramas de influencia (DI) como modelo de análisis de decisiones alternativo a los árboles de decisión. En los años 90 se crearon grupos de investigación en las universidades más

prestigiosas y la mayor parte de las empresas líderes en el mundo de la informática empezaron a investigar sobre los MGPs, tal como vamos a comentar más adelante.

En España surgieron grupos de investigación de forma independiente en varias universidades. En 1996 estos grupos se unieron para solicitar un proyecto de investigación, que se desarrolló entre 1997 y 2000, financiado por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (TIC-97-1135-C04). El título oficial era *Entorno para el Desarrollo de Modelos Gráficos Probabilísticos*; en esta memoria lo denominaremos **Proyecto Elvira I**. Su logro principal, a parte de las numerosas publicaciones a que dio lugar, consistió en la construcción del **programa Elvira**,¹ una herramienta implementada en Java, que sirvió como banco de pruebas para los nuevos algoritmos desarrollados en el proyecto, así como para la docencia y para el desarrollo de diversas aplicaciones [Elvira Consortium, 2002].

El éxito obtenido llevó a los investigadores a solicitar un nuevo proyecto, **Elvira II: Aplicaciones de los Modelos Gráficos Probabilísticos**, compuesto de cinco subproyectos financiados por el Ministerio de Ciencia y Tecnología (TIC-2001-2973-C05). En él, a parte de continuar con el desarrollo del programa Elvira, que cuenta en la actualidad con unas 120.000 líneas de código en Java, se construyeron aplicaciones para medicina, genómica, comercio electrónico y agricultura.

En la actualidad los MGPs constituyen una tecnología madura, utilizada por millones de usuarios (tanto Windows y Office, de Microsoft, como el filtrado de correo basura de Netscape/ Mozilla los aplican, tal como vamos a comentar en seguida). Sin embargo, para que los MGPs puedan utilizarse en problemas de mayor complejidad es necesario disponer de métodos de representación más potentes y flexibles que las redes bayesianas y los diagramas de influencia tradicionales (DI). Existen propuestas recientes orientadas a flexibilizar los requisitos de los DI actuales con el fin de obtener modelos más generales [Jensen y Vomlelová, 2002; Nielsen et al., 2004], pero la representación del conocimiento sigue siendo engorrosa para problemas en que existe un elevado número de decisiones no ordenadas, y aún no se ha abordado el problema del razonamiento temporal explícito.

En resumen, los MGPs surgieron hace unos 25 años (aunque hubo algunos trabajos pioneros anteriores) y su uso se ha extendido exponencialmente desde 1990, pero todavía es necesario avanzar en la representación del conocimiento y en el desarrollo de algoritmos eficientes para poder aplicarlos en problemas de mayor complejidad.

b) Toma de decisiones en la medicina actual

La toma de decisiones en medicina ha experimentado cambios muy significativos en los últimos años, debido principalmente a la mayor disponibilidad de técnicas diagnósticas y terapéuticas, al continuo incremento del gasto sanitario y a las mayores exigencias de los pacientes. El primer cambio provocado por esta situación es que, al aumentar la complejidad de las decisiones, el sentido común del médico ya no es suficiente, y por ello se hace necesario utilizar técnicas formales y **sistemas de ayuda a la decisión** que contribuyan a escoger la mejor opción en cada caso.

El segundo cambio es que tradicionalmente tanto los médicos como la opinión pública eran muy reacios a considerar explícitamente el coste económico en la práctica clínica. Sin embargo, la necesidad de controlar el gasto sanitario, que se está disparando en prácticamente todos los países (no sólo en el capítulo farmacéutico), obliga a tener en cuenta el coste de cada intervención, pues la utilización de técnicas poco eficientes consume recursos que se podrían dedicar a otras más eficientes [Eddy, 1996]. Por este motivo las políticas sanitarias prestan cada vez mayor interés a la evaluación de tecnologías sanitarias,² uno de cuyos elementos fundamentales son los **estudios de coste-efectividad**.

¹ En www.ia.uned.es/~elvira puede obtenerse información detallada sobre el proyecto: documentos científico-técnicos que describen el trabajo realizado hasta la fecha, manuales de instalación y de usuario para el programa Elvira, en español y en inglés, código fuente completo (actualizado cada semana), especificación formal del formato para guardar redes, con varios ejemplos; etc.

² En los últimos años han surgido organizaciones para la evaluación de tecnologías sanitarias en prácticamente todos los países desarrollados, así como varias asociaciones internacionales. En España existe la Agencia de Evaluación de Tecnologías Sanitarias, del Instituto de Salud Carlos III, y varias agencias autonómicas en Cataluña, País Vasco, Andalucía... La Unidad de Evaluación de Tecnologías Sanitarias, de la Agencia Laín Entralgo de la Comunidad de Madrid, participa activamente como EPO en este proyecto.

Por todo ello los sistemas de ayuda a la decisión están llamados a desempeñar un papel cada vez más relevante en la medicina actual, y entre las técnicas más apreciadas en la inteligencia artificial se encuentran los MGPs.³

c) Análisis del riesgo de crédito

En los últimos cuarenta años han sido muy numerosas las investigaciones publicadas sobre modelos de predicción de la insolvencia empresarial [Altman y Saunders, 1998]. Entre los principales usuarios de estos modelos se encuentran las entidades financieras, que han de evaluar a las empresas que solicitan un crédito y realizar posteriormente un seguimiento de su situación económica y financiera. En este sentido, los modelos de predicción de insolvencia pueden ser incorporados como herramienta que facilite la toma de decisiones en el análisis de riesgos y posibilite la detección precoz de desequilibrios en la empresa deudora.

La investigación en esta materia ha adquirido especial relevancia tras la aprobación en junio de 2004 del *Nuevo Acuerdo de Capital de Basilea* (conocido como **Basilea II**), que regula el ratio de solvencia que han de mantener las entidades financieras. A partir de su entrada en vigor, en diciembre de 2007, las entidades financieras podrán utilizar sus propios modelos internos de riesgo de crédito para calcular su capital regulatorio. Las entidades que cuenten con modelos más precisos y fiables tendrán una ventaja competitiva frente a las demás.

Los modelos tradicionales, basados principalmente en el análisis discriminante multivariable y los modelos de regresión cualitativa (*probit* y *logit*) se apoyan en hipótesis que, en el caso de los ratios financieros, no se cumplen en la mayoría de los casos (normalidad de la distribución, variables independientes, etc.). Por ello algunos investigadores han recurrido a la utilización de metodologías alternativas, basadas en la inteligencia artificial, que no requieren la adopción de ninguna hipótesis previa sobre la estructura de los datos y sus interrelaciones ni sobre la distribución de los ratios económico-financieros. En particular, en los últimos años, ha aparecido un buen número de trabajos que demuestran las ventajas que pueden aportar en este campo las redes bayesianas por su capacidad de combinar conocimiento de expertos con datos observacionales, por la posibilidad de analizar los modelos resultantes y por la facilidad para tratar datos incompletos o erróneos (véase [Gerssen, 2004] y sus referencias bibliográficas) y existen al menos dos programas comerciales para evaluación de riesgo de crédito mediante redes bayesianas: *BayesCredit*, de la empresa danesa Nykredit, e *iRisk*, de la inglesa Agena.⁴

2.3. Grupos nacionales e internacionales que trabajan en la misma materia

a) Grupos nacionales

En España la investigación sobre modelos gráficos probabilistas está ligada sobre todo a las universidades. La coordinación entre distintos grupos se inició a través de la lista de distribución LERPIA,⁵ de RedIRIS, puesta en marcha en 1995 por el IP de este proyecto. En la actualidad prácticamente todos los investigadores españoles e hispanoamericanos de esta área están suscritos a ella.

Más adelante se inició el proyecto coordinado Elvira I, ya mencionado, en el que participaron cuatro grupos de sendas universidades: Almería, Granada, País Vasco y UNED. En el proyecto Elvira II se añadió un quinto grupo y subproyecto de la Universidad de Castilla-La Mancha. En la actualidad, los investigadores de este proyecto siguen colaborando activamente en el desarrollo del **programa Elvira**, cuyo código fuente, disponible en un servidor CVS, recibe varias actualizaciones cada mes.

Por otro lado, en el curso 2005-06 ha empezado a impartirse el programa de **doctorado interuniversitario Modelos probabilísticos para la inteligencia artificial y la minería de datos**, cuyos

³ Baste señalar en este sentido que Davis, Buchanan y Shortliffe afirmaron en la revista *Artificial Intelligence* (1993) que si hoy tuvieran que hacer de nuevo el sistema experto MYCIN, en vez de reglas y factores de certeza utilizarían redes bayesianas.

⁴ La relevancia actual de las redes bayesianas en este campo y en particular en relación con el *Acuerdo de Basilea II* puede comprobarse introduciendo en Google los términos “Bayesian networks” y “Basel II”, “credit risk”, “credit scoring”, etc.

⁵ La dirección de la lista es lerpia@listserv.rediris.es; véase www.ia.uned.es/~fjdiez/lerpia/

profesores son aproximadamente los mismos investigadores del *Proyecto Elvira II*, lo cual nos permite (y nos obliga a) mantener reuniones periódicas que sirven también para intercambiar resultados de investigación.

Otro medio de colaboración entre los investigadores de esta área es la **Red Temática sobre Modelos Gráficos Probabilísticos y Aplicaciones**, subvencionada por el Ministerio de Educación y Ciencia, en la cual participan diez universidades (Almería, Cantabria, Castilla-La Mancha, Granada, País Vasco, Politécnica de Cataluña, Politécnica de Madrid, Rey Juan Carlos, Sevilla y UNED) y el CSIC. Hay también investigadores en las Universidades de Jaén, Pompeu-Fabra, Málaga, Oviedo, Vigo, etc. Esto nos permite afirmar que España es uno de los países que cuentan con mayor número de centros que realizan investigación sobre MGPs (tan sólo por detrás de EE.UU. y quizá Canadá), con una estrecha colaboración entre la mayor parte de los grupos.

En cuanto al sector privado en España, la primera empresa que se ha interesado por las redes bayesianas es Panda Software, una compañía líder en la fabricación de antivirus que tiene sedes y franquicias en más de 50 países. Esta empresa firmó un contrato de consultoría con el IP de este proyecto al amparo del artículo 83 de la LOU para incorporar esta tecnología en sus productos.

Por su parte, el Centro de Seguridad Nuclear ha financiado un proyecto de investigación, dirigido por el Dr. Severino Fernández Galán, profesor de la UNED e investigador de este nuevo proyecto, cuyo objetivo es la aplicación de las redes bayesianas para reducir el riesgo de accidentes en centrales nucleares.

b) Grupos internacionales

Como hemos mencionado anteriormente, la mayor parte de las universidades más prestigiosas cuentan con grupos de trabajo que investigan sobre modelos gráficos probabilistas: Stanford, MIT, Harvard, Carnegie-Mellon, UCLA...

En cuanto al sector privado, prácticamente todas las grandes empresas de la informática investigan sobre este tema, especialmente Microsoft, que en 1992 contrató a David Heckerman, uno de los investigadores más prestigiosos de este campo. Desde Windows 95, con un diagrama de influencia para el diagnóstico de problemas de impresión [Heckerman et al., 1995], y Office 97, con redes bayesianas para recuperación de información y modelado del usuario,⁶ Microsoft incluye esta tecnología en sus principales productos. Otras empresas, como Intel, IBM, Siemens, Hewlett-Packard, General Electrics, etc., también investigan activamente en este campo.

A la vez están surgiendo empresas de base tecnológica (*spin-offs* y *start-ups*) cuya metodología de trabajo principal son las redes bayesianas y/o los diagramas de influencia. La primera de ellas fue Hugin, en Dinamarca, ligada a la Universidad de Aalborg, y luego surgieron otras como Bayesware, DecisionQ, Knowledge Industries, IET, Lumina, Noetic Systems, Norsys, SmartOrg y varias más en Estados Unidos, Bayesia en Francia, InferSpace en Inglaterra, SMART Research en Holanda, ReasonEdge en Singapur, etc., lo cual demuestra que los MGPs constituyen hoy en día una tecnología madura, apta para resolver problemas complejos del mundo real.

En Hispanoamérica, México es el país donde más se investiga sobre MGPs. En el proyecto Elvira II participaron el Prof. Enrique Sucar, del ITESM, Campus de Cuernavaca, y el Dr. Gustavo Arroyo, del Instituto de Investigaciones Eléctricas, también de Cuernavaca. (Los investigadores de la UNED tenemos trabajos en vías de publicación en colaboración con ambos.) Varias universidades y centros públicos mexicanos también trabajan sobre este tema. A través de la lista LERPIA tenemos noticias de que también en otros países hispanoamericanos, como Argentina, Colombia, Costa Rica y Cuba, hay investigadores en esta área, aunque al parecer no existen aún grupos consolidados.

2.4. Bibliografía

- E.I. Altman and A. Saunders (1998) Credit risk measurement: Developments over the last 20 years. *Journal of Banking and Finance* 21, 1721-1742.
- E. Castillo, J.M. Gutiérrez, A.S. Hadi (1997) *Sistemas Expertos and Modelos de Redes Probabilísticas*. Monografías de la Academia de Ingeniería, Madrid. Publicado simultáneamente en inglés por la editorial Springer, Nueva York.

⁶ Es el denominado *Proyecto Lumiere*; véase <http://research.microsoft.com/~horvitz/lum.htm>.

- F.J. Díez (1998) Aplicaciones de los modelos gráficos probabilistas en medicina. En: J.A. Gámez and J.M. Puerta. *Sistemas Expertos Probabilísticos*. Ediciones de la Universidad de Castilla-La Mancha, Cuenca; págs. 239-263.
- S. Dizdarevic, F. Lizarraga, P. Larrañaga, B. Sierra y M.J. Gallego (1997). Statistical and machine learning methods in the prediction of bankruptcy. *Proc. International Meeting on Artificial Intelligence in Accounting Finances and Taxes*, Huelva, Spain, 85-100.
- M.F. Drummond, M.J. Sculpher, G.W. Torrance, B.J. O'Brien and G.L. Stoddart (2005) *Methods for the Economic Evaluation of Health Care Programmes*. Oxford University Press, Oxford, RU, 3ª edición.
- Elvira Consortium (2002) Elvira: An environment for creating and using probabilistic graphical models. *Proc. First European Workshop on Probabilistic Graphical Models (PGM'02)*. Cuenca, Spain, pp. 1-11.
- D.M. Eddy (1996) *Clinical Decision Making. From Theory to Practice*. Jones and Barlett, Sudbury, MA.
- S. Gerssen (2004) *Bayesian networks in credit rating*, Master of Science Thesis, Delft University of Technology, Holanda.
- M.R. Gold, J.E. Siegel, L.B. Russell and M.C. Weinstein (Eds.) (1996) *Cost-Effectiveness in Health and Medicine*. Oxford University Press, Nueva York.
- D. Heckerman, J.S. Breese y K. Rommelse (1995). Decision-Theoretic Troubleshooting. *Communications of the ACM*. 38:49-57.
- R. A. Howard and J. E. Matheson (1984) Influence diagrams. En: R. A. Howard and J. E. Matheson (eds.), *Readings on the Principles and Applications of Decision Analysis*. Strategic Decisions Group, Menlo Park, CA, págs. 719-762.
- F.V. Jensen (2001) *Bayesian Networks and Decision Graphs*, Springer-Verlag, Nueva York.
- F.V. Jensen and M. Vomlelová (2002) Unconstrained influence diagrams. *Proc. 18th Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI-02)*, Edmonton, Canada. Morgan Kaufmann, San Francisco, págs. 234-241.
- F.V. Jensen, T.D. Nielsen and P.P. Shenoy (2004). Sequential influence diagrams: A unified asymmetry framework. *Proc. 2nd European Workshop on Probabilistic Graphical Models (PGM-04)*, págs. 121-128.
- P. Juez and F. J. Díez (1996) *Probabilidad and Estadística en Medicina. Aplicaciones en la Práctica Clínica and en la Gestión Sanitaria*. Díaz de Santos, Madrid.
- J. Pearl (1988) *Probabilistic Reasoning in Intelligent Systems: Networks of Plausible Inference*. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA.

3. OBJETIVOS DEL PROYECTO

(máximo dos páginas)

3.1 Describir brevemente las razones por las cuales se considera pertinente plantear esta investigación y, en su caso, la hipótesis de partida en la que se sustentan los objetivos del proyecto (máximo 20 líneas)

La investigación planteada en este proyecto presenta un doble interés. Por un lado, las redes de análisis de decisiones (RAD) suponen un avance del “estado del arte” sobre modelos gráficos probabilistas (MGP), tanto en lo relativo a la representación del conocimiento como a los algoritmos de inferencia, que a su vez pueden dar lugar a nuevos desarrollos teóricos y la construcción de aplicaciones de mayor calidad. Por otro lado, en este proyecto se van a abordar dos problemas de mucha actualidad y gran interés social: la toma de decisiones en medicina, con especial énfasis en los sistemas de ayuda a la decisión y el análisis de coste-efectividad, y el análisis del riesgo de crédito orientado a evitar la morosidad y el riesgo de quiebra en entidades financieras, de acuerdo con los objetivos y las directrices del acuerdo de *Basilea II*.

El hecho de que en otros países se estén abordando estos mismos problemas con MGPs similares, junto con los resultados obtenidos hasta la fecha dentro y fuera de España, justifican la aplicación estos métodos a los problemas planteados en este proyecto.

3.2. Indicar los antecedentes y resultados previos, del equipo solicitante o de otros, que avalan la validez de la hipótesis de partida

El trabajo sobre MGP en la UNED se inició en 1990 con la tesis doctoral de F.J. Díez, que consistió en la construcción del sistema experto DIAVAL, una red bayesiana para el diagnóstico de enfermedades de corazón mediante ecocardiografía, y constituyó la primera aplicación de los MGP realizada en España. Esta tesis recibió el Premio Fundesco de Tesis Doctorales de 1994, entregado públicamente por el Sr. Ministro de Educación y Ciencia, en consideración tanto a la aplicación construida como a los avances metodológicos y algorítmicos que aportó. Dos de las publicaciones derivadas de esta tesis se encuentran en varias selecciones de bibliografía de esta especialidad (cf. sec. 6.b.1).

Posteriormente, los investigadores de la UNED contribuyeron activamente en la construcción programa Elvira, ya mencionado, para la construcción y evaluación de MGP, financiado por la CICYT (Proyecto Coordinado de I+D TIC97-1135-C04-04), la Comunidad de Madrid (Beca para la Incorporación de Técnicos a Proyectos de Investigación), el Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto Coordinado de I+D TIC2001-2973-C05-04) y el Ministerio de Educación y Ciencia (Red Temática TIN2004-21428-E, iniciada en 2005 y renovable hasta 2008).

El programa Elvira, ya mencionado, consta en la actualidad de unas 120.000 líneas de código Java, y cuenta con numerosos algoritmos de inferencia y de aprendizaje de redes a partir de bases de datos, así como una interfaz avanzada para la edición y evaluación de modelos gráficos probabilistas. El grupo de la UNED se ha ocupado de la construcción de la interfaz gráfica, en especial de la edición de redes bayesianas y diagramas de influencia y de la integración de todos los algoritmos de inferencia y aprendizaje aportados por los diferentes grupos. Las contribuciones más novedosas de nuestro grupo han sido el diseño e implementación de varios algoritmos de inferencia y de los métodos de explicación del razonamiento, tanto para redes bayesianas como para diagramas de influencia.

Este programa ha sido muy útil para la construcción de aplicaciones en medicina, genética y agricultura. Las aplicaciones médicas, construidas por el grupo de la UNED, se han centrado en el diagnóstico de cáncer de próstata (en la tesis doctoral de Carmen Lacave), cáncer de rinofaringe (tesis doctoral de Severino Fernández) y cáncer de pulmón (tesis doctoral de Manuel Luque, que será terminada en 2007). También hemos utilizado Elvira para la depuración de HEPAR, una red bayesiana para diagnóstico de enfermedades hepáticas, dentro de un proyecto internacional en que la UNED ha participado junto con la Universidad de Pittsburgh y la Academia Polaca de la Ciencia.

En la actualidad, Elvira está siendo utilizado para la docencia sobre MGPs en licenciaturas, ingenierías, cursos de posgrado y doctorado, en diversas universidades de al menos ocho países (véase la sec. 6.b.2).

Entre los antecedentes debemos mencionar también, por su relación con la tarea B.2 (análisis del riesgo de crédito), las tesis doctorales de Inmaculada Pra, *Modelos de riesgo de crédito en entidades financieras*, defendida en 2004, y la de Raquel Arguedas, *Innovación y gestión de riesgos en las entidades financieras: Medición, control y gestión del riesgo de mercado*, que está casi terminada.

3.3. Enumerar brevemente y describir con claridad, precisión y de manera realista (es decir, acorde con la duración prevista del proyecto) los **objetivos concretos** que se persiguen, los cuales deben adecuarse a las líneas temáticas prioritarias del Programa Nacional al que se adscribe el proyecto (*ver Anexo de la convocatoria*).

La novedad y relevancia de los objetivos (así como la precisión en la definición de los mismos) se mencionan explícitamente en los criterios de evaluación de las solicitudes (*ver apartado Noveno de la Convocatoria*)

1. **Definición formal** de las redes de análisis de decisiones (RAD) como método probabilista de representación del conocimiento.
2. Diseño e implementación en Elvira de **algoritmos** para la evaluación de RAD: cálculo de las utilidades esperadas y las políticas de actuación para cada una de las decisiones.
3. Diseño e implementación de métodos de **explicación del razonamiento** para RAD.
4. Diseño e implementación de métodos de **análisis de sensibilidad**, tanto probabilistas como no probabilistas.
5. Diseño e implementación del análisis de **coste-efectividad** mediante RAD.
6. Construcción de RAD para varios **problemas médicos**:
 - diagnóstico de cáncer de pulmón;
 - cribado del cáncer en pacientes con tromboembolismo venoso;
 - priorización de pacientes en listas de espera de cirugía de cataratas.
7. Construcción de una RAD para el **análisis del riesgo** en la concesión de **créditos**, según las directrices del acuerdo de *Basilea II*.

Estos objetivos se adecuan a los siguientes prioridades del *Plan Nacional de I+D+i*:

- *P.N. de Tecnologías Informáticas*
 - Prioridad temática 3: Sistemas inteligentes. Línea prioritaria 3.3: Softcomputing. Agentes adaptativos y evolutivos. Tratamiento de la imprecisión y la incertidumbre.
- *P.N. de Matemáticas*
 - Línea prioritaria 1.5: Sistemas expertos e inteligencia artificial.
 - Prioridad temática 11: Probabilidad. Línea prioritaria 11.5: Aplicaciones (economía, finanzas, ingeniería, genética, comunicaciones, etc.
 - Línea prioritaria 12.3. Teoría de la decisión.
- *P.N. de Biomedicina*
 - Su objetivo es “ayudar a tomar mejores decisiones sobre los cuidados sanitarios”. Incluye la “investigación metodológica en análisis de decisiones y coste-efectividad” (pág. 29).
- *P.N. de Tecnologías para la Salud y el Bienestar*
 - La prioridad temática “Tecnologías de la información y de la comunicación en medicina” incluye los “sistemas inteligentes de ayuda al diagnóstico” (pág. 49).

4. METODOLOGÍA Y PLAN DE TRABAJO

Se debe **detallar y justificar con precisión la metodología y el plan de trabajo** que se propone y debe exponerse la planificación temporal de las actividades, incluyendo cronograma (se adjunta un posible modelo a título meramente orientativo).

- ◆ El plan de trabajo debe desglosarse en actividades o tareas, fijando los hitos que se prevé alcanzar en cada una de ellas. En los proyectos que empleen el Hespérides o se desarrollen en la zona antártica, deberán también incluir el plan de campaña en su correspondiente impreso normalizado.
- ◆ En cada una de las tareas debe indicarse el centro ejecutor y las personas (ver apartados 2.1, 2.2 y 2.3 del formulario de solicitud) involucradas en la misma. Si en el proyecto participan investigadores de otras entidades no relacionados en el apartado 2.3 del formulario de solicitud, deberán exponerse los méritos científicos que avalan su participación en el proyecto.
- ◆ Si solicita ayuda para personal contratado justifique claramente su necesidad y las tareas que vaya a desarrollar.

La adecuación de la metodología, diseño de la investigación y plan de trabajo en relación con los objetivos del proyecto se mencionan explícitamente en los criterios de evaluación de las solicitudes (*ver apartado Noveno de la convocatoria*).

En cuanto a las tareas que vamos a exponer a continuación, las hemos clasificado en dos grupos: en el grupo A están las tareas “básicas” o genéricas, es decir, las que no se refieren a ningún campo de aplicación concreto, mientras que en el grupo B hemos incluido dos tareas aplicadas.

A. Métodos y algoritmos para análisis de decisiones mediante MGPs

Tarea A.1: Definición formal de las redes de análisis de decisiones (RAD)

Como hemos mencionado ya, los dos métodos más habituales para el análisis de decisiones son los árboles de decisión (AD), que surgieron a mediados del S. XX, y los diagramas de influencia (DI), que se desarrollaron en la década de los 80. Los DI tienen la ventaja de que son mucho más compactos y de que utilizan probabilidades simples directas (es decir, de cada efecto dadas sus causas), y por tanto más fáciles de construir y de modificar que los AD. Otra ventaja es que los algoritmos de evaluación suelen ser mucho más eficientes. Por ello, hay problemas que, por contener un gran número de variables, sólo pueden ser resueltos mediante DI y no mediante AD. En cambio, los DI presentan dos inconvenientes: exigen de un orden total entre las decisiones y sólo pueden ser aplicados a problemas de decisión simétricos, salvo con adaptaciones artificiosas y no escalables, lo cual hace que sean inaplicables en muchos problemas prácticos.⁷

Nuestro objetivo es desarrollar un nuevo modelo gráfico probabilista, las RAD, que sean aún más compactas que los DI y a la vez que permitan decisiones parcialmente ordenadas o no ordenadas, con lo cual lograrían una capacidad de representación prácticamente equivalente a la de los AD, pero siendo mucho más fáciles de construir y de modificar. De este modo, las RAD permitirán resolver problemas que por su complejidad y tamaño no pueden ser resueltos con AD ni con DI.

Aunque ya tenemos una idea de cuáles son las propiedades básicas de las RAD y sus diferencias frente a los DI —principalmente, la ausencia de arcos de información, la existencia de “arcos de revelación” y la indicación de las variables conocidas espontáneamente en cada unidad temporal—, aún es necesario establecer una definición formal y comprobar que permite representar todos o casi todos los problemas que se presentan en el análisis de decisiones en medicina.

Temporización (en meses)

M1–M2.	Definición formal de RAD.
M3–M4.	Extensión del formato Elvira para almacenar y leer RAD.
M5–M6.	Extensión de la interfaz gráfica de Elvira para editar RAD.

⁷ Ello explica por qué en medicina apenas se utilizan los diagramas de influencia, tal como se discutió en el seminario impartido por el IP de este proyecto en la Escuela de Salud Pública de Harvard en junio de 2005. Las transparencias de este seminario están disponibles en www.cisiad.uned.es.

Tarea A.2: Algoritmos para evaluación de RAD

Como punto de partida, estudiaremos la extensión y adaptación de los algoritmos desarrollados en la Universidad de Aalborg (Dinamarca) ⁸ para DI sin restricciones [Jensen y Vomlelová, 2002; Jensen et al., 2004]. La idea básica consistirá en descomponer cada RAD, que en general será muy asimétrica y contendrá decisiones no ordenadas, en varias RAD simétricas y totalmente ordenadas, que podrán ser resueltas con los algoritmos habituales para redes bayesianas, en particular con el algoritmo de eliminación de variables propuesto y evaluado por nuestro grupo [Luque y Díez, 2004]. Estos algoritmos incorporarán también la posibilidad de trabajar con modelos canónicos, como la puerta OR-MAX [Díez, 1993], que aparece frecuentemente al construir modelos para medicina y permite acelerar considerablemente la inferencia [Díez y Galán, 2003].

Temporización (en meses)

- M7–M12. Desarrollo e implementación de nuevos algoritmos.
- M13–M18. Evaluación empírica de la eficiencia de los algoritmos.

Tarea A.3: Explicación del razonamiento para RAD

Al construir MGP para distintas aplicaciones, especialmente en medicina, hemos constatado la dificultad de nuestros expertos para comprender cómo y por qué las probabilidades y utilidades introducidas conducían a una u otra política de actuación. La explicación del razonamiento es imprescindible no sólo para la construcción y refinamiento de los modelos, sino también para que los futuros usuarios acepten el consejo del sistema experto. A pesar de la importancia del tema, las herramientas informáticas de la actualidad apenas ofrecen la posibilidad de explicar el “razonamiento” implícito en un MGP: hasta la fecha sólo ha habido propuestas inconexas (véase una revisión sistemática en [Lacave y Díez, 2000]) que no han llegado a implementarse en herramientas disponibles públicamente, salvo en el programa Elvira y —en menor medida— en GeNIE.

En efecto, Elvira cuenta con métodos avanzados de explicación del razonamiento para redes bayesianas, que constituyeron la tesis doctoral de la Prof^a Carmen Lacave [2003], investigadora de este proyecto, y posteriormente se han extendido a DI [Lacave et al., 2006].

En el proyecto que ahora proponemos está previsto continuar desarrollando nuevos métodos tanto para DI como para RAD, basados principalmente en el valor de la información [Ezawa, 1998], en la probabilidad de futuras decisiones [Nilsson y Jensen, 1998] y otros métodos relacionados con el análisis de sensibilidad.

En cualquier caso, la selección de métodos de explicación del razonamiento que, al igual que los métodos propuestos por nuestro grupo para la explicación en redes bayesianas, vendrá determinada por las necesidades que surjan al construir aplicaciones reales (cf. tareas B.1 y B.2 de este proyecto).

Temporización (en meses)

- M13–M24. Diseño e implementación de nuevos métodos de explicación.
- M25–M36. Evaluación de los métodos de explicación en las RAD de las tareas B.1 y B.2, y refinamiento.

Tarea A.4: Análisis de sensibilidad para modelos gráficos probabilistas

Dado que generalmente los parámetros que forman un MGP (tanto las probabilidades como las utilidades) no se conocen con precisión, es preciso llevar a cabo un análisis de sensibilidad (AS) para determinar si las variaciones de dichos parámetros dentro de sus rangos de incertidumbre pudieran llevar a conclusiones diferentes. Según Felli y Hazen [1998] hay dos tipos de AS: análisis de la utilidad (“value sensitivity”) y análisis de las políticas de actuación (“decision sensitivity”). En cuanto al tipo de incertidumbre, el análisis puede ser probabilista (cada parámetro lleva asociada una distribución de probabilidad) o no probabilista (cada parámetro varía dentro de un rango).

Recientemente hemos incorporado a Elvira los métodos de AS no probabilista más habituales: análisis sobre un parámetro (*one-way sensitivity analysis*), diagramas de tornado, diagramas de

⁸ En 2005 Manuel Luque Gallego, investigador de este proyecto, ha pasado tres meses en la Universidad de Aalborg, dentro del grupo del Prof. Jensen, estudiando nuevos algoritmos para DI no tradicionales, con una beca predoctoral concedida por la Comunidad de Madrid.

araña, etc. En este nuevo proyecto hemos previsto implementar métodos de AS probabilistas que, en principio, sirven tanto para DI como para RAD. Como punto de partida consideraremos la posibilidad de extender los métodos propuestos por Doubilet et al. [1985] y Felli y Hazen [1998]. Dado que estos métodos requieren el uso de simulaciones de Monte Carlo, estudiaremos los métodos de simulación más avanzados para DI [Bielza et al., 1999; Ortiz y Kaelbling 2000].

También estudiaremos si es posible adaptar algunos de los métodos de análisis de sensibilidad para redes bayesianas, tales como los propuestos recientemente por Adnan Darwiche y su grupo de la UCLA, y los que va a desarrollar Neilys González Benítez, estudiante de doctorado de la Universidad de Pinar del Río (Cuba), bajo la dirección de la Prof^a Carmen Lacave, investigadora de este proyecto

Temporización (en meses)

- M13–M24. Diseño e implementación de métodos de análisis de sensibilidad probabilistas.
- M25–M30. Evaluación de los métodos de análisis de sensibilidad en las RAD de las tareas B.1 y B.2.
- M31–M36. Análisis de sensibilidad para el análisis de coste-efectividad.

Tarea A.5: Análisis de coste-efectividad mediante RAD

Los estudios de coste-efectividad desempeñan un papel cada vez más importante en numerosos campos, muy especialmente en medicina, por la necesidad de optimizar el uso de los recursos disponibles, tal como hemos señalado en el apartado 2.2.b.

La forma habitual de realizar este tipo de análisis es mediante árboles de decisión; los DI apenas se utilizan, pues junto a ventajas indudables presentan también serias limitaciones. La utilización de RAD aportaría grandes ventajas, como la modularidad y la causalidad en la representación del conocimiento, y mayor eficiencia en la evaluación. También permitirían actualizar el estudio al obtener nueva información o al incorporar nuevas pruebas diagnósticas y nuevos tratamientos, así como adaptarlo a diferentes regiones geográficas e incluso individualizarlo para pacientes concretos. De hecho, los estudios de coste-efectividad en medicina se refieren siempre a la población general o a un subgrupo de pacientes. En cambio, la utilización de RAD permitiría calcular el coste-efectividad para cada paciente específico en función de la información disponible (antecedentes, síntomas, signos, tests, etc.). Otra limitación de los estudios actuales es que exigen que el árbol de decisión tenga un solo nodo de decisión, mientras que nosotros pretendemos extender el método a RAD con varios nodos de decisión.

Temporización (en meses)

- M19–M22. Algoritmos para análisis de coste-efectividad mediante RAD.
- M23–M24. Implementación en Elvira
- M25–M30. Evaluación en los problemas médicos de la tarea B.1.
- M31–M36. Análisis de sensibilidad para el análisis de coste-efectividad.

B. Aplicaciones

Tarea B.1: Análisis de decisiones en medicina

En este proyecto está previsto construir RAD para los siguientes problemas médicos:

a) Diagnóstico del cáncer de pulmón

Este trabajo, realizado en colaboración con el Dr. Carlos Disdier, del Hospital San Pedro de Alcántara, de Cáceres, se inició dentro del proyecto Elvira II y consistió en la construcción de un DI para el diagnóstico del cáncer de pulmón, o de forma más precisa, para la estadificación mediastínica del cáncer de pulmón no microcítico a partir de diferentes pruebas: TAC, PET, broncoscopia, mediastinoscopia, etc. Sin embargo, este modelo, por las limitaciones propias de los DI, es incapaz de responder a la cuestión principal planteada por el médico: en qué orden deben realizarse las pruebas diagnósticas. Éste fue el motivo principal que nos llevó a buscar un modelo de análisis de decisiones más potente, tal como hemos comentado en la introducción de esta memoria. En este proyecto está previsto convertir el DI en una RAD que permita conocer cuál es el orden óptimo en la realización de los tests.

Los datos numéricos, que para la construcción del DI se obtuvieron de la tesis doctoral del Dr. Disdier y de la literatura médica, serán refinados a partir de los artículos médicos más recientes y de las nuevas bases de datos recopiladas por el Dr. Disdier y su equipo en el Servicio de Neumología del Hospital San Pedro de Alcántara.

b) Priorización de pacientes en listas de espera

Las listas de espera constituyen uno de los problemas más acuciantes de los sistemas de sanidad públicos. Basta observar con qué frecuencia es objeto de debate político en los medios de comunicación, debido a que es quizá el indicador de calidad que los ciudadanos perciben más directamente. Las agencias de evaluación, entre las que se encuentra Unidad de Evaluación de Tecnologías Sanitarias (UETS) de la Comunidad de Madrid, están especialmente interesadas en optimizar su gestión.⁹ La UETS, que junto con la UNED forma parte de una red temática sobre este tema financiada por el Ministerio de Sanidad y participa en este proyecto como EPO, ha propuesto a nuestro grupo la construcción de un sistema de ayuda a la decisión para la priorización pacientes en listas de espera de cirugía de cataratas, que es una de las que tiene mayor número de pacientes. Una vez construido este sistema será fácil adaptarlo para otras listas de espera, como la de prótesis de rodilla, que constituirá nuestro próximo objetivo.

En la RAD para cirugía de cataratas las variables aleatorias serán la agudeza visual del paciente antes de la intervención, la mejoría esperada, la valoración subjetiva de la propia enfermedad (que depende de la edad y la profesión del paciente), etc.; las decisiones serán los posibles tratamientos, incluyendo el momento en que se aplican, y la utilidad vendrá dada por la calidad de vida, medida según alguno de los cuestionarios elaborados y validados para este tipo de pacientes.

Los expertos serán los oftalmólogos del Hospital 12 de Octubre (Getafe, Madrid) y otros hospitales, seleccionados por la UETS. En este proyecto no solicitamos financiación para esta tarea porque será cubierta con cargo a un proyecto subvencionado por el Fondo de Investigaciones Sanitarias.

c) Cribado del cáncer en pacientes con tromboembolismo venoso

Los pacientes con enfermedad tromboembólica venosa (ETV) idiopática, es decir, trombosis venosa profunda o embolia pulmonar sin factor predisponente conocido, tienen una probabilidad de padecer cáncer mucho más alta que los pacientes con ETV secundaria a cualquier factor predisponente. El cribado de dichos pacientes con la intención de localizar un tumor oculto en fase preclínica podría conllevar una intervención precoz, mejorando así los resultados asistenciales e incluso podría ahorrar recursos sanitarios. Sin embargo, debido a que el cáncer puede estar localizado en cualquier órgano, hay un amplio abanico de exploraciones complementarias susceptibles de ser utilizadas, y por ello resulta difícil decidir qué pacientes debemos investigar y en qué orden deben aplicarse las pruebas.

Para abordar este problema vamos a construir una RAD que incluya como variables aleatorias los datos personales del paciente, los síntomas y signos y las pruebas diagnósticas; cada nodo de decisión indicará si una prueba se realiza o no; la utilidad vendrá dada por la cantidad de vida ajustada en calidad. Los parámetros del modelo (prevalencia, sensibilidad, especificidad, tasas de supervivencia y calidad de vida) se obtendrán de la literatura médica.

En la construcción de esta red los expertos serán los Dres. Antonio Javier Trujillo, del Hospital Sta. M^a del Rosell, de Cartagena (Murcia), y Manuel Monreal, del Hospital Germans Trias i Pujol, de Badalona (Barcelona). Para esta tarea hemos solicitado financiación adicional de la Fundación para la Formación e Investigación Sanitarias, vinculada a la Consejería de Sanidad de la Comunidad de Murcia, y de la Fundación Mapfre Medicina (cf. sec. 6.1) y por ese motivo no hemos incluido en la presente solicitud los gastos de viajes y dietas asociados a esta tarea.

Temporización (en meses)

- | | |
|-----------|---|
| M1–M6. | Fase cualitativa: formalización del conocimiento y construcción de los grafos causales. |
| M7–M12. | Fase cuantitativa: determinación de las probabilidades condicionadas a partir de bases de datos y de estimaciones subjetivas. |
| M13–M-24. | Evaluación y refinamiento del modelo. |

⁹ Véase http://www.listadeesperamadrid.com/guia/cap09/evalua_tecn_sant.htm.

- M25–M33. Análisis de coste-efectividad.
- M34–M36. Análisis de sensibilidad del análisis de coste-efectividad.

Tarea B.2: Análisis del riesgo de crédito

El objetivo de esta tarea es construir modelos de análisis de riesgo y de ayuda a la decisión de concesión de créditos (cf. apartado 2.2.d). Los datos para desarrollar el modelo se extraerán de las cuentas anuales de empresas no financieras domiciliadas en la Comunidad de Madrid, aprovechando el acuerdo que el Departamento de Economía de la Empresa y Contabilidad de la UNED tiene con la Comunidad Autónoma de Madrid para acceder a esos datos. También se pretende incorporar en los modelos variables de tipo cualitativo sobre la empresa así como variables relacionadas con la fase del ciclo económico y el sector en que ésta desarrolla su actividad.

La novedad de nuestra investigación frente a los productos comerciales *BayesCredit* e *iRisk* mencionados en el apartado 2.2.d es que esos sistemas modelan el conocimiento mediante redes bayesianas, mientras que el nuestro utilizará una RAD, de modo que, además de nodos aleatorios, incluirá también nodos de decisión y de utilidad, que permitirán representar explícitamente las preferencias de la entidad financiera y las acciones que puede llevar a cabo en caso de impago.

Los responsables de llevar a cabo esta tarea son los cuatro profesores del mencionado Departamento de Economía participantes en este proyecto, apoyados por los miembros del Dpto. de Inteligencia Artificial en el modelado del conocimiento (*knowledge engineering*), en la utilización del programa Elvira —incluyendo la posibilidad de añadir al programa las funcionalidades que sean necesarias para esta aplicación— y en la evaluación de los modelos.

Temporización (en meses)

- M1–M12. Fase cualitativa: formalización del conocimiento y construcción del grafo causal
- M13–M24. Fase cuantitativa: determinación de las probabilidades condicionadas a partir de estimaciones subjetivas y de las bases de datos.
- M25–M30. Análisis de sensibilidad
- M31–M36. Evaluación del modelo y refinamiento a partir de nuevos datos

4.1 CRONOGRAMA

En este cronograma figura la totalidad del personal investigador incluido en el formulario de solicitud y el personal contratado que se solicita con cargo al proyecto. En cada tarea aparece subrayado el nombre de la persona responsable.

Actividades/Tareas	Persona responsable y otras involucradas	Primer año (*)	Segundo año (*)	Tercer año (*)
A.1. Definición formal	<u>F. J. Díez</u> , C. Lacave, M. Luque, M. Arias, S. Fernández	██████████		
A.2. Algoritmos de evaluación	<u>M. Luque</u> , F.J. Díez, M. Arias, S. Fernández, C. Lacave, A. Manjarrés		██████████	
A.3. Explicación del razonamiento	<u>C. Lacave</u> , S. Fernández, F.J. Díez, M. Luque, L.M. Sarro		██████████	██████████
A.4. Análisis de sensibilidad	<u>S. Fernández</u> , C. Lacave, F.J. Díez, P. Juez, M. Arias, M. Luque		██████████	██████████
A.5. Análisis de coste-efectividad	<u>M. Arias</u> , F.J. Díez, P. Juez, C. Lacave, L.M. Sarro, S. Fernández, A. Manjarrés			██████████
B.1. Análisis de decisiones en medicina	<u>P. Juez</u> , C. Lacave, F.J. Díez, M. Luque, M. Arias, L.M. Sarro, A. Manjarrés	██████████	██████████	██████████
B.2. Análisis del riesgo de crédito	<u>A. Muñoz</u> , D. de la Fuente, I. Pra, R. Arguedas, P. Juez, F.J. Díez	██████████	██████████	██████████

5. BENEFICIOS DEL PROYECTO, DIFUSIÓN Y EXPLOTACIÓN DE LOS RESULTADOS

Contribuciones científicas. Procederán principalmente de las tareas de objetivo genérico (A.1 a A.4), en que se van a desarrollar nuevos métodos y algoritmos para modelos gráficos probabilísticos (MGPs), y en menor medida de la construcción de aplicaciones de las RADs.

Beneficios. Los sistemas de ayuda a la decisión en medicina (tarea B.1) pueden ser muy útiles para el sistema sanitario, en particular para los pacientes y los profesionales de la sanidad, tanto en lo relativo al diagnóstico del cáncer y la mejora en la gestión de las listas de espera como en otros problemas que puedan abordarse en el futuro con la metodología desarrollada en este proyecto.

La aplicación sobre análisis de riesgo de crédito (B.2) supondrá un mejor conocimiento de la problemática de la insolvencia, lo cual significará un beneficio, en primer lugar, para las entidades financieras, e indirectamente para el conjunto de la sociedad: considerése la alarma social que genera una entidad financiera que, por haber arriesgado demasiado en la concesión de créditos, corre peligro de quiebra.

Transferencia y explotación de resultados. La Unidad de Evaluación de Tecnologías Sanitarias (UETS) de la Comunidad de Madrid, que participa activamente como EPOs en este proyecto, así como los hospitales de los médicos que van a colaborar en la tarea B.1, están interesados en que los resultados de nuestras investigaciones lleguen a aplicarse a la práctica clínica. Por su parte, la empresa Técnicas Avanzadas de Investigación en Servicios de Salud (TAISS), que también participa como EPO, está interesada en colaborar con los investigadores de este proyecto en los estudios de coste-efectividad que realiza, generalmente por encargo de empresas farmacéuticas y sociedades médicas (véase la carta adjunta y las páginas www.taiss.com).

En cuanto al análisis del riesgo de crédito (tarea B.2), el Director Gerente de Riesgos de Caja Madrid ha expresado el interés de dicha entidad por los resultados de este proyecto (véase la carta que ha redactado como EPO).

Por otra parte, que, con el fin de facilitar la transferencia de resultados de investigación, en particular la gestión de los contratos con empresas, el IP de este proyecto propuso a la UNED la creación de un Centro de Investigación sobre Sistemas Inteligentes de Ayuda a la Decisión (CISIAD), en el que participan casi todos los investigadores de este proyecto. Fue aprobado en mayo de 2004 y vinculado al Instituto de Investigación de la UNED (véase www.cisiad.uned.es).

En este sentido, la empresa TechnoSafe, especialista en análisis de riesgos, que participa en este proyecto como EPO, desea aplicar en sus actividades los resultados de nuestra investigación, en particular en el proyecto conjunto de un consorcio empresarial denominado "Home Land Security", y por ello tiene previsto firmar próximamente un acuerdo de colaboración con el CISIAD al amparo del artículo 83 de la LOU o bien mediante la solicitud de un proyecto PETRI o similar.

Por otro lado, el Prof. Javier Díez asistió al Curso de Verano de la UCM sobre *Creación de Empresas de Base Tecnológica* celebrado en El Escorial en 1999, y en el curso 2004-05 realizó el *X Programa Formativo para la Creación de Empresas de Base Tecnológica* impartido por el Vivero Virtual de Empresas de la Comunidad de Madrid. Al finalizar este curso presentó, junto con el Prof. Pedro Juez y D. Fernando Pérez, del Dpto. de Economía Aplicada y Gestión Pública de la UNED, un *plan de negocio* para la creación de una empresa dedicada a comercializar los sistemas de ayuda a la decisión desarrollados en el CISIAD. Aunque los expertos del Vivero Virtual valoraron el plan de negocio como muy interesante y con muchas posibilidades de éxito, no tenemos previsto crear tal empresa antes de tres o cuatro años —como mínimo— dada la dificultad de compaginar esta tarea con las labores de investigación, que son nuestra prioridad.

Prioridades del Plan Nacional. La adecuación de este proyecto a varias de las líneas prioritarias del Plan Nacional de I+D+i está detallada en la sección 3.3.

Plan de difusión. Los resultados de investigación se publicarán por los canales habituales de divulgación científica: libros, revistas y congresos, ya sea de inteligencia artificial, de análisis de decisiones, de medicina o de economía, dependiendo de los casos. También estarán accesibles en el servidor web del CISIAD, cuya sección de Publicaciones tiene cinco apartados: libros, artículos, congresos, informes técnicos y tesis (véase www.cisiad.uned.es).

6. HISTORIAL DEL EQUIPO SOLICITANTE EN EL TEMA PROPUESTO

(máximo dos páginas)

◆ **Indicar las actividades previas del equipo y los logros alcanzados en el tema propuesto:**

Si el proyecto es continuación de otro previamente financiado, deben indicarse con claridad los objetivos ya logrados y los resultados alcanzados.

Si el proyecto aborda una nueva temática, deben indicarse los antecedentes y contribuciones previas del equipo, con el fin de justificar su capacidad para llevar a cabo el nuevo proyecto.

Este apartado, junto con el 3, tiene como finalidad determinar la adecuación y capacidad del equipo en el tema (y en consecuencia, la viabilidad de la actividad propuesta).

a) Actividades previas

En la sección 3.2 (antecedentes y resultados previos) hemos mencionado ya la labor realizada por nuestro grupo en años anteriores. Falta añadir, tan sólo, que las tareas A.1 a A.5 coinciden en gran medida con los objetivos de las tesis doctorales de Manuel Arias y Manuel Luque, y que algunos de los resultados preliminares obtenidos ya han sido publicados en congresos internacionales: el Prof. Arias ha presentado sendos trabajos en la *Seventh International Conference on Knowledge-Based Intelligent Information & Engineering Systems* (Oxford, Reino Unido, 2003) y en el *European Workshop on Probabilistic Graphical Models* (Leiden, Holanda, 2004), y en 2005 ha enviado un artículo al *International Journal of Approximate Reasoning*. Manuel Luque presentó otro trabajo en el mismo congreso de Leiden (*PGM-04*) y otro en el *Workshop on Intelligent Data Analysis in Medicine and Pharmacology (IDAMAP-05)*, celebrado en Aberdeen, Reino Unido. También en 2005 ha enviado un artículo a la revista *Journal of Artificial Intelligence Research*, que tiene un elevado índice de impacto.

Las tareas B.1 (construcción de un diagrama de influencia para cirugía de cataratas) y B.2 (análisis de riesgo de crédito) son ante todo una labor de ingeniería del conocimiento mediante MGPs, un campo en que el grupo de la UNED tiene una larga experiencia, pues en los últimos años hemos desarrollado redes bayesianas para diversos campos de la medicina, como ecocardiografía, cáncer de próstata, cáncer de rinofaringe, enfermedades hepáticas, etc., dos de las cuales ya han aparecido publicadas en la revista *Artificial Intelligence in Medicine*, la más prestigiosa de la especialidad [Díez et al., 1997; Galán et al., 2002].

Por otro lado, como hemos mencionado en la sección 3.2, las tesis doctorales de Inmaculada Pra, defendida en 2004, y Raquel Arguedas, que será presentada en 2007, tienen como tema el análisis del riesgo de crédito en entidades financieras, coincidiendo así con el área de la tarea B.2.

b) Logros alcanzados

b.1) Publicaciones en revistas internacionales

Aunque la producción científica de este grupo no es muy abundante, sí cuenta con artículos destacados, entre los que se encuentran los siguientes:

- El trabajo "Parameter adjustment in Bayes networks. The generalized noisy OR-gate" [Díez, 1993] fue presentado en el congreso *Uncertainty in Artificial Intelligence*, el más importante de la especialidad. Ha sido referenciado en numerosas ocasiones y aparece en varias selecciones de bibliografía sobre redes bayesianas, como puede comprobarse en Google. El modelo estudiado en este trabajo ha sido utilizado por Microsoft para construir un modelo de diagnóstico de problemas de impresión incluido en el sistema operativo Windows desde la versión de 1995 (cf. sec. 2.3.b).
- El algoritmo de condicionamiento local [Díez, 1996], fue publicado en la revista *Artificial Intelligence*, la más prestigiosa del área (tiene uno de los índices de impacto más altos y el mayor "cited half-life"). Este artículo ha sido referenciado en numerosas ocasiones y ha servido de base para trabajos posteriores en Europa y Estados Unidos.
- El artículo [Druzdzel y Díez, 2003] ha sido publicado en el *Journal of Machine Learning Research*, la revista de mayor índice de impacto en inteligencia artificial.

Sus autores han publicado trabajos en revistas destacadas, como *Artificial Intelligence in Medicine* (tres artículos), *Knowledge Engineering Review* (dos), *Internacional Journal of Approximate Reasoning* y *Expert Systems with Applications* —que se encuentran todas en la mitad

superior de la clasificación por índice de impacto— y bastantes artículos más en otras revistas incluidas en el Journal Citation Reports.

b.2) Reconocimiento internacional

El programa Elvira, desarrollado por este grupo en colaboración con otras universidades españolas, está siendo utilizado para la investigación y la docencia en varias universidades extranjeras, como las de Aalborg (Dinamarca), Białystok (Polonia), Buenos Aires (Argentina), Nacional de Trujillo (Perú), Nijmegen (Holanda), el Instituto Tecnológico de Buenos Aires (Argentina), el Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM, México, en sus sedes de Ciudad de México, Cuernavaca y Monterrey) y el Instituto de Investigaciones Eléctricas, de Cuernavaca (México).

Además el IP de este proyecto ha sido invitado a impartir dos seminarios sobre Elvira en la Escuela de Salud Pública de Harvard, en 2002 y en 2005, y una conferencia invitada en un congreso europeo (Varsovia, 2002). El programa Elvira fue seleccionado para figurar en el *2004 Yearbook of the International Medical Informatics Association* como una de las aplicaciones de informática médica más relevantes del año [Díez, 2004].

El Prof. Díez ha participado como revisor invitado de varias revistas destacadas y de la *Internacional Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)* y ha sido miembro del Comité de Programa de la *Conference on Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI)*, la más importante sobre MGPs, desde 1998 hasta 2004, inclusive, y de otros muchos congresos internacionales.

b.3) Reconocimiento oficial

El IP de este proyecto ha obtenido de la CNEAI el reconocimiento de dos sexenios, y solicitará el tercero en diciembre de 2007. Ángeles Manjarrés tiene reconocido uno y solicitará el segundo en diciembre de este año. Severino Fernández tiene uno, y Carmen Lacave ha presentado su primera solicitud en diciembre de 2005, avalada por cuatro artículos publicados en revistas internacionales con índice de impacto. Luis M. Sarro ha obtenido la acreditación de la ANECA como Profesor Contratado Doctor.

c) Viabilidad

La viabilidad del proyecto viene garantizada, a nuestro juicio por los resultados obtenidos anteriormente por los miembros de este grupo, tanto en los estudios sobre MGPs, como en el desarrollo del sistema experto Elvira y en la construcción de redes bayesianas y diagramas de influencia para distintos problemas, especialmente en medicina, ya mencionados.

El contacto frecuente con la mayor parte de los investigadores que trabajan sobre MGPs en España es otro factor que contribuirá positivamente al éxito del proyecto, pues en nuestro país contamos con expertos en prácticamente todas las áreas de los MGPs, lo cual nos permitirá disponer de la ayuda necesaria en caso de que debamos abordar alguna cuestión algo más alejada de nuestra experiencia.

Por otro lado, en este proyecto aprovecharemos muchas de las clases y métodos desarrollados para redes bayesianas y diagramas de influencias, con los cuales las RAD comparten muchos elementos en común. Hace unos años los investigadores que querían realizar una tesis doctoral sobre MGP tenían que programar desde cero todos los algoritmos: pársers, operaciones con potenciales, interfaces, etc. En la actualidad el trabajo realizado en Elvira nos permitirá reducir de forma muy significativa el tiempo requerido para este nuevo proyecto.

Por último, vamos a contar con expertos que aportarán el conocimiento necesario para construir las aplicaciones: médicos muy cualificados de varios hospitales, para la tarea B.1, y cuatro profesores del Departamento de Economía de la Empresa y Contabilidad de la UNED con una larga experiencia en análisis de riesgo de crédito, para la tarea B.2.

6.1 FINANCIACIÓN PÚBLICA Y PRIVADA (PROYECTOS Y CONTRATOS DE I+D) DE LOS MIEMBROS DEL EQUIPO INVESTIGADOR (*)

Debe indicarse únicamente lo financiado en los últimos cinco años (2001-2005), ya sea de ámbito autonómico, nacional o internacional.

Deben incluirse las solicitudes pendientes de resolución.

Título del proyecto o contrato	Relación con la solicitud que ahora se presenta (1)	Investigador Principal	Subvención concedida o solicitada (en euros)	Entidad financiadora y referencia del proyecto	Periodo de vigencia o fecha de la solicitud (2)
Diagnostic Systems Based on Graphical Decision-Theoretic Methods	1	M. J. Druzdzel (general) F. J. Díez Vegas (España)	\$ 9.476	NATO Science Programme (Collaborative Linkage Grant PST.CLG.976167)	1999-2001 C
Planificación inteligente en web	3	J. G. Boticario	31.102 €	Comunidad de Madrid (07T/0024/2000)	2001-2002 C
Elvira II: Aplicaciones de los modelos gráficos probabilísticos	1	Serafín Moral (coord.) F. J. Díez Vegas (UNED)	Total: 384.011 € UNED: 98.554 €	MCyT (TIC-2001-2973-C05-04)	2001-2004 C
aLFanet: Active Learning For Adaptive Internet	3	J. G. Boticario	Total: 4.401.181 € UNED: 704.145 €	Comunidad Europea (IST-2001-33288)	2002-2005 C
Investigación en servicios sanitarios para la toma de decisiones en el Sistema Nacional de Salud. Aplicación práctica a las listas de espera	2	P. Juez Martel	48.510 €	FIS. Red temática (G03/202)	2003-2006 C
Utilización de modelos gráficos probabilistas para evaluar el impacto de los factores organizativos en el riesgo de accidente en centrales nucleares	2	S. Fernández Galán	21.600 €	Consejo de Seguridad Nuclear	2004-2005 C
Modelos gráficos probabilísticos y aplicaciones	1	J. A. Lozano Alonso	9.000 € (1 ^{er} año)	MEC. Red temática (TIN2004-21428-E)	2005-2006 C (prorrogable)
Sistema informatizado basado en la valoración multidimensional (VM) para la gestión y la clínica del hospital de asistencia a crónicos, media y larga estancia (HACMLE) "Padre Jofré" de Valencia	2	R. Navarro Sanz	6.000 €	Consejería de Sanidad Comunidad Valenciana	2005-2006 C

Análisis de coste-efectividad del cribado de cáncer en pacientes con tromboembolismo venoso	1	A. J. Trujillo Santos	15.314 €	Fundación para la Formación e Investigación Sanitarias (Murcia)	2006-2009 S
Estudio de la efectividad de las estrategias de cribado de cáncer en pacientes con tromboembolismo venoso	1	A. J. Trujillo Santos	9.000 €	Fundación Mapfre Medicina	2006-2007 S
Redes de análisis de decisiones para los estudios de coste-efectividad en medicina	0	F. J. Díez Vegas	46.500 €	Fundación de Investigación Médica MMA	2006-2008 S
TeCKeT-CM: Grupo de Tecnologías del Conocimiento	2	D. Borrajo Millán	Total: 902.680 € UNED: 89.749 €	Comunidad de Madrid Conv. Grupos de Investigación	2006-2009 S (superada la primera fase de selección)

(*) Véase apartado 5^o.5 de la Convocatoria

(1) Escríbase 0, 1, 2 o 3 según la siguiente clave:

0 = Es el mismo proyecto; 1 = está muy relacionado; 2 = está algo relacionado; 3 = sin relación

(2) Escríbase una C o una S según se trate de una concesión o de una solicitud.

Notas.

1. El Prof. Luis Sarro, antes de incorporarse a la UNED y empezar a investigar sobre modelos gráficos probabilistas, participó en varios proyectos de astrofísica que no hemos incluido en esta lista porque no tienen ninguna relación con el resto del grupo ni con la solicitud actual.
2. El proyecto presentado a la Fundación de Investigación Médica MMA coincide con el presentado en esta memoria, salvo en que aquél no incluye la tarea B.2. En la solicitud presentada a dicha fundación se indica que la mayor parte del presupuesto se destinaría a la contratación de un titulado superior en informática, que se ocuparía de la programación en Java, y que el resto de los gastos (material inventariable, viajes de los investigadores, etc.) se cubrirían con cargo a este proyecto que ahora presentamos al MEC.

7. CAPACIDAD FORMATIVA DEL PROYECTO Y DEL EQUIPO SOLICITANTE

Este apartado sólo debe rellenarse si se ha respondido afirmativamente a la pregunta correspondiente en el cuestionario de solicitud. Debe justificarse que el equipo solicitante está en condiciones de recibir becarios (del Programa de Formación de Investigadores) asociados a este proyecto y debe argumentarse la capacidad formativa del equipo. En caso de Proyecto Coordinado, debe rellenarse por cada subproyecto que solicite becarios de FPI.

Cualificación. Nueve de los 12 participantes en este proyecto (75%) son doctores, y los otros tres tienen previsto terminar sus tesis doctorales antes de dos años. Sobre los logros del grupo solicitante (resultados previos, publicaciones, reconocimiento oficial, sexenios, etc.), véanse las secciones 3.2, 6.a y 6.b. Entre ellos destacamos, por su relación con este punto, que en los últimos tres años han dirigido tres tesis doctorales sobre los temas de este proyecto, una de las cuales recibió el Premio Extraordinario de Doctorado.

Dedicación. Once de los 12 investigadores de este proyecto participan en él con dedicación única (cf. apartado Noveno.2.b de la convocatoria).

Relación con otros grupos de investigación. Tal como hemos comentado en la sección 2.3.a, nuestro grupo mantiene una estrecha colaboración con la casi totalidad de los investigadores que trabajan sobre MGPs en España a través de una lista de distribución (creada por el IP de este proyecto), el trabajo de desarrollo del programa Elvira, un programa de doctorado interuniversitario y una red temática financiada por el MEC. En caso de recibir una beca de FPI para este proyecto, el candidato seleccionado se inscribiría en dicho programa de doctorado, titulado *Modelos probabilísticos para la inteligencia artificial y la minería de datos*, lo cual le permitiría formarse con los mejores expertos de nuestro país, varios de los cuales cuentan con un prestigio significativo a nivel internacional.

En cuanto a la interacción con grupos de otros países, tenemos varias publicaciones en colaboración con los Profs. Marek Druzdzel, director del *Decision Systems Laboratory* de la Universidad de Pittsburgh, y Miguel Ángel Hernán, Director Adjunto del grupo de investigación sobre análisis causal en epidemiología de la Universidad de Harvard, y estamos trabajando con ellos en otros artículos que aparecerán en 2006. También tenemos trabajos en colaboración con Agnieszka Oniśko (Universidad de Białystok, Polonia), Enrique Súcar (ITESM, México) y Gustavo Arroyo (Instituto de Investigaciones Eléctricas, México) que están siendo evaluados en revistas del área. Por otro lado, Manuel Luque Gallego, investigador de este proyecto, ha realizado en 2005 una estancia de tres meses en el departamento del Prof. Jensen en Aalborg (Dinamarca), que es en la actualidad el grupo de investigación más importante sobre modelos gráficos probabilistas.

Estas relaciones de colaboración establecidas por nuestro grupo permitirían al becario/a de FPI estar en contacto con la investigación más avanzada que en estos momentos se está llevando a cabo en nuestro campo.

Recíprocamente, entre los doctorandos extranjeros que van a formarse en nuestro grupo debemos mencionar, en primer lugar a Neilys González Benítez, estudiante de doctorado de la Universidad de Pinar del Río (Cuba), que va trabajar bajo la dirección de la Prof^a Carmen Lacave para la obtención del Diploma de Estudios Avanzados dentro del programa de doctorado de la Universidad de Castilla-La Mancha "Arquitectura y gestión de la información y del conocimiento en sistemas de red". Dicho programa disfruta de la Mención de Calidad otorgada por la Agencia Nacional de Evaluación de la Calidad y Acreditación, desde Noviembre de 2002, y en él participan estudiantes de varios países hispanoamericanos.

Igualmente, la UNED va a acoger, de febrero a mayo de 2006, a Marcel van Gerven, estudiante de doctorado de la Universidad de Nijmegen (Holanda). El hecho de que su director de tesis, el Prof. Peter Lucas, destacado investigador sobre MGPs, haya considerado que éste es el más adecuado para dicha estancia constituye, a nuestro juicio, un indicador del reconocimiento internacional y la capacidad formativa del grupo que presenta este proyecto.
