

CAPÍTULO

4

MODELOS COMPUTACIONALES PARA LA INTEGRACIÓN CONCEPTUAL



Pedro Martins¹,
Francisco C. Pereira²,
Amílcar Cardoso¹
¹ CISUC, DEI, University
of Coimbra, Portugal
² Massachusetts
Institute of Technology
(MIT), USA

RESUMEN

La capacidad de vincular fragmentos de información que en apariencia no tienen relación entre sí es una de las características claves de una mente creativa. Muchos descubrimientos importantes en la historia de la humanidad son el resultado de explorar más allá de las fronteras del dominio de estudio en cuestión; es decir, de buscar conexiones inesperadas entre conceptos que permitan descubrir formas no obvias de traspasar los límites de un espacio conceptual, con el fin de alcanzar áreas inexploradas. Este capítulo adopta un enfoque interdisciplinario de la creatividad computacional al estudiar la construcción de modelos computacionales basados en una teoría psicocognoscitiva para la creación de conceptos, conocida como Integración de Conceptual (IC), propuesta por Fauconnier y Turner (2002). Las páginas de este capítulo reseñan la investigación actual y pasada acerca de la aplicación de esta teoría en sistemas computacionales, con énfasis en la investigación realizada por nuestro equipo, en particular en el desarrollo de nuestro programa Divago (Pereira, 2007). También se describen la arquitectura y la operación del sistema, ilustradas con ejemplos concretos, además de que se presenta y analiza la evaluación de los resultados.

4.1 INTRODUCCIÓN

Diversas teorías psicocognoscitivas construidas alrededor del fenómeno de la creatividad comparten el principio de que hay una fuerte correlación entre lo que se entiende como actividad creativa y la facultad de establecer relaciones entre fragmentos de información que en apariencia no tienen relación alguna entre sí. Por ejemplo, Guilford (1950) introdujo el *pensamiento divergente* como un proceso clave para la creatividad, el cual hace referencia a la capacidad para generar múltiples ideas innovadoras y diferentes soluciones para un mismo problema. En un intento por explicar la creatividad humana, Koestler (1964) introdujo el término *bisociación* para describir el proceso por el cual se juxtaponen dos matrices de pensamiento semánticamente distantes, lo que posibilita conexiones entre conceptos en apariencia no relacionados. Según Koestler, la bisociación es la fuente de la creatividad, ya sea en el arte, la ciencia o el humor.

Elaborar modelos computacionales de fenómenos, como el pensamiento divergente o la bisociación, constituye una tarea en extremo desafiante. Sin embargo, muchos descubrimientos importantes a lo largo de la historia son el resultado de aventurarse a encontrar relaciones novedosas entre conceptos distantes, donde uno de estos está fuera de los límites del dominio del conocimiento del fenómeno que se estudia. Por tanto, resulta atractivo explorar formas de aplicar dichas teorías en un contexto que involucre múltiples dominios del saber; es decir, donde un sistema de razonamiento computacional tenga acceso a una base de conocimientos heterogénea, (donde convergen conocimientos de diferentes dominios, los cuales pueden o no tener relaciones explícitas entre sí). Este capítulo se desarrolla con base en la hipótesis de que en dicho contexto es factible lograr, en cierta medida, la representación del pensamiento divergente mediante estrategias de *razonamiento en múltiples dominios*, inspiradas en procesos de bisociación. Lo anterior requiere de manera inexorable la transferencia de conocimiento y significado entre diferentes dominios. La *metáfora* y la *analogía* son algunos ejemplos de dichos mecanismos. Sin embargo, es inútil trasladar el significado si el conocimiento transferido no es *integrado* de una manera significativa al nuevo entorno. Dicho de otra manera, el proceso debe dar como resultado la generación de estructuras de conocimiento que puedan considerarse como un todo, con una estructura emergente, y no solo como una simple concatenación de ideas.

Con el propósito de lograr una *integración*, se requieren mecanismos con la capacidad de generar estructuras de conocimiento originales que permitan extender las ya existentes. Hay dos teorías principales que giran alrededor de dicho proceso de integración: *Combinación conceptual e Integración de Conceptos*(IC). La primera se enfoca en el estudio de combinaciones sustantivo-sustantivo (como “sofá cama”, “auto escuela” o “sala comedor”) y se ubica en el contexto de la lingüística (Keane y Costello, 2001), mientras que la segunda revela un proceso por el cual se integran conceptos para dar origen a uno nuevo; es decir, a una estructura emergente (Fauconnier y Turner, 2002).

Aunque la IC no es un modelo de creatividad en sí mismo, debido a que en ocasiones la teoría es vaga y poco propensa a la formalización cuando trata aspectos cruciales del pensamiento creativo, esta teoría no solo proporciona una adecuada descripción del proceso de integración, sino también ofrece una terminología y un conjunto de principios consistentes que pueden usarse en el modelamiento computacional de la creatividad. Como resultado, la IC ha sido la base para el desarrollo de varios sistemas creativos artificiales.

En este capítulo se revisa la investigación actual y pasada acerca de la aplicación de la teoría de la IC en el diseño de programas de cómputo creativos. De este modo, se presentan y analizan diferentes enfoques de esta teoría, de los que se resaltan sus ventajas y desventajas. En este contexto, se hace una descripción más detallada de Divago (Pereira, 2005), un modelo computacional para la invención de conceptos, que constituye el sistema computacional más desarrollado y completo de la teoría de la IC hasta la fecha. Para una descripción más detallada de la teoría de la IC remitimos al lector al capítulo titulado “Integración y creatividad computacional” en este libro.

4.2 EL MARCO TEÓRICO DE LA IC: UNA BREVE RESEÑA

En la teoría de la IC, un elemento clave es el *espacio mental*, un término acuñado por Fauconnier para describir una estructura de conocimiento parcial y temporal creada con el propósito de llegar a la comprensión de una situación dada (Fauconnier, 1994).

Para el estudio de la IC se utiliza una representación visual que conecta al menos cuatro espacios mentales (véase figura 4.1). Dos de ellos, o incluso algunas veces más, corresponden a *espacios conocidos como de entrada, los cuales son los dominios* iniciales (donde se encuentran los conceptos que se quieren integrar). A continuación, se construye una conexión entre los elementos comunes de los espacios de entrada. Esta conexión se representa en otro espacio mental, conocido como el *espacio genérico*, que captura las estructuras conceptuales que son compartidas por las entradas. El resultado del proceso de integración conceptual se guarda en la *combinación*, un espacio mental que contiene las estructuras comunes de los espacios de entrada combinadas con nuevos elementos que forman una estructura emergente propia (es decir, un nuevo concepto).

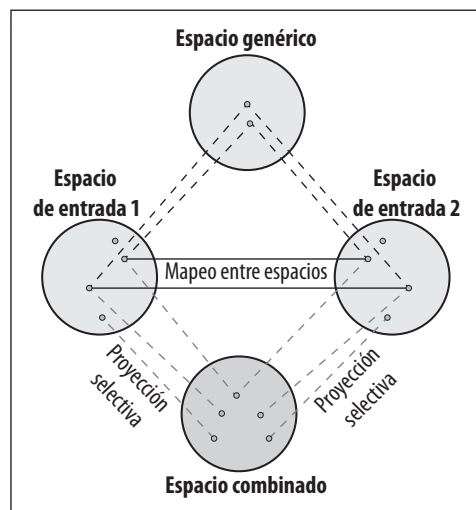


Figura 4.1 La red original de la integración conceptual de cuatro espacios (Fauconnier y Turner, 2002).

A continuación, en la figura 4.2, se observa un ejemplo de la integración conceptual donde la noción “virus de computadora” es resultado de la combinación de dos espacios mentales: “virus” y “computadora”. Más adelante, en el apartado 4.4, se presenta una descripción más detallada de este proceso, por ahora solo se señalan de forma breve sus etapas principales. En la figura 4.2 se puede ver el mapeo inicial (es decir, la asociación de los elementos comunes en las entradas, representado con líneas gruesas discontinuas): “Computadora” ↔ “Huésped” y “Programa” ↔ “Virus”, lo cual pretende ser la analogía de una computadora con un organismo huésped y de un programa de computadora con un virus. A partir de estas correspondencias se hacen proyecciones selectivas (es decir, solo de algunos elementos) desde cada espacio de entrada hacia el nuevo espacio mezclado; por ejemplo, los conceptos “computadora”, “instrucción”, “programa” y “binario” se proyectan (transfieren) desde el espacio “computadora”, mientras que los conceptos “virus”, “recursos”, “duplicar”, “capacidad” e “indeseable” se proyectan desde el espacio “virus”; también se proyectan de manera selectiva relaciones entre estos conceptos. El resultado es un espacio combinado para un dominio nuevo que describe lo que se conoce como “virus de computadora”. El espacio mezclado toma prestadas piezas de los dos espacios de entrada y tiene su propia estructura emergente. El papel del espacio genérico no es visible en este ejemplo simplificado, no obstante se aclara más adelante cuando se describe con mayor amplitud y detalle este proceso.

De acuerdo con la teoría de la IC, la integración de elementos de entrada en el espacio combinado es el resultado de tres operaciones: *composición*, *culminación* y *elaboración*.

La *composición* ocurre cuando algunos elementos de los espacios de entrada son proyectados (transferidos) al espacio combinado, donde surgen nuevas relaciones entre ellos. Esto implica proyectar en la mezcla no solo los elementos comunes de las entradas, sino también elementos circundantes, como se ilustra en el ejemplo anterior. La *culminación* ocurre cuando se usa el conocimiento existente en la memoria a largo plazo; es decir, el conocimiento de experiencias previas (también referidas como marcos), para generar estructuras significativas en la combinación.

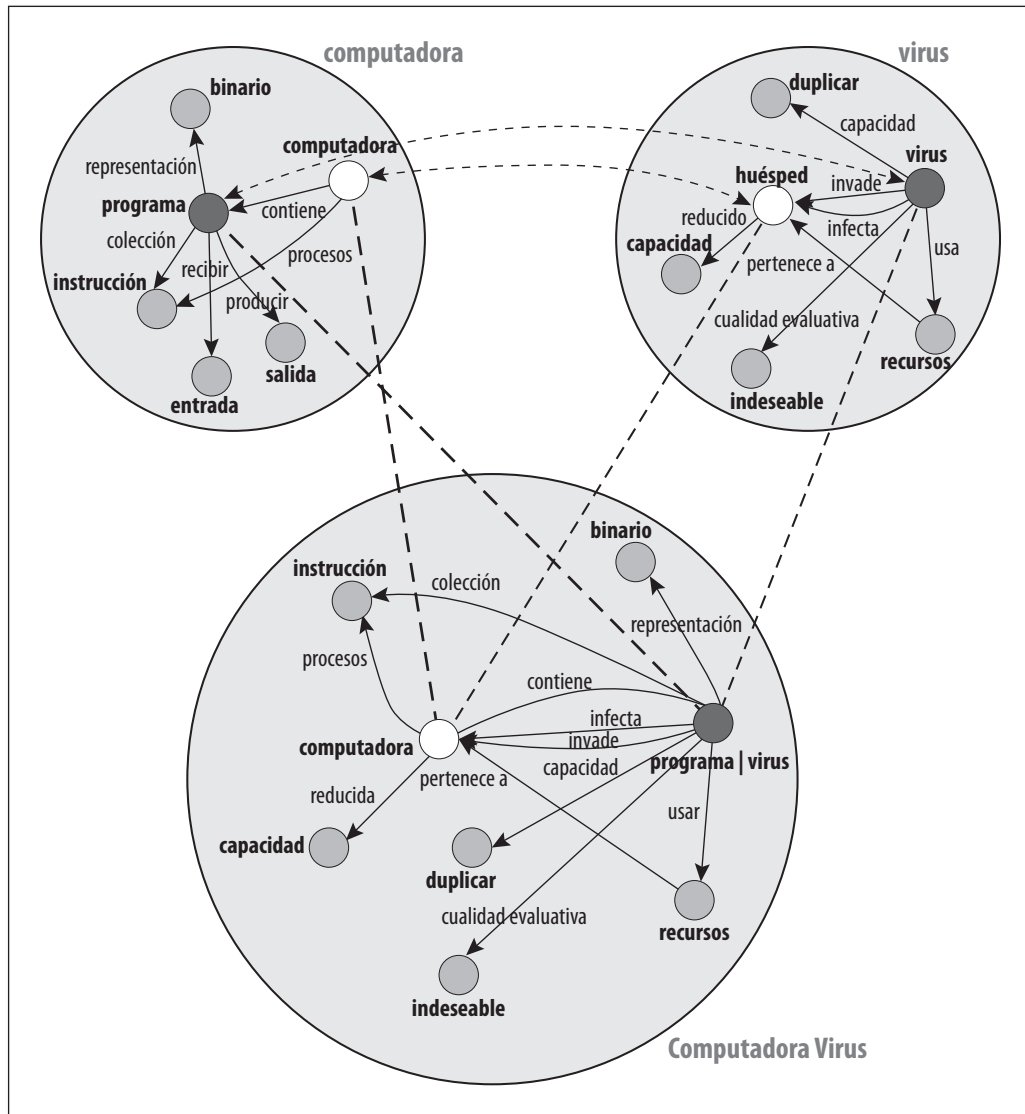


Figura 4.2 La combinación “virus de computadora”.

La *elaboración* es una operación estrechamente relacionada con la *culminación*; implica trabajo cognoscitivo para llevar a cabo una simulación del espacio combinado. La elaboración también se conoce como “ejecutar la combinación”. No hay un orden preestablecido para estas operaciones y pueden ocurrir en varias ocasiones.

Aunque las posibilidades para mezclar conceptos parecen ilimitadas, no todas las combinaciones resultantes son “buenas”. Por ello, la integración es guiada por *principios de optimalidad* (Fauconnier y Turner, 1998), que son los responsables de generar las llamadas “combinaciones correctas”; es decir, combinaciones consistentes que son interpretadas con más facilidad. Fauconnier y Turner elaboraron una lista de estos principios. Por ejemplo, el *principio de integración* enuncia que la combinación debe ser reconocida como una unidad. Otro ejemplo es el *principio de desentrañamiento*, el cual asegura que la combinación por sí sola debe permitir al lector u observador desentrañarla para reconstruir las entradas, el mapeo entre espacios, el espacio genérico y la red de conexiones entre todos estos espacios. También está el *principio de relevancia*, que requiere la existencia de una razón para que ocurra la combinación. Otros principios, como *topología*, *red* y *culminación del patrón*, son responsables de manejar la relación entre los espacios de entrada y la combinación.

4.3 ENFOQUES COMPUTACIONALES PARA LA IC

El diseño de sistemas creativos artificiales es un campo que ha ganado terreno en forma gradual en la comunidad de la inteligencia artificial. Por lo general, estos modelos computacionales dependen de teorías cognoscitivas. La naturaleza intuitiva del pensamiento creativo es el factor principal que dificulta la construcción de una teoría amplia y más formal de la creatividad, lo que, en consecuencia, hace más desafiante el diseño de enfoques computacionales. No obstante, a la fecha ya existe una cantidad significativa de soluciones interesantes y promisorias.

En 1999, Goguen usó semiótica algebraica para elaborar una teoría de la IC. Su trabajo fue el primer intento de este tipo. Y aunque fue más una formalización que un enfoque estrictamente computacional, ha sido una influencia importante en el diseño de sistemas artificiales. Goguen trató los espacios de entrada como sistemas de signos y las combinaciones de conceptos como morfismos semióticos de sistemas de signos. Sin embargo, Goguen no intentó proporcionar una teoría completa y exhaustiva de la IC. Según el autor, no pudieron formalizarse aspectos como los principios de optimalidad.

Uno de los primeros enfoques computacionales para la IC fue el de Veale y O'Donoghue (2000), que se basa en el modelo de metáfora de Sapper (Veale, 1995) para mezclar en forma dinámica dos dominios. Este sistema tiene la capacidad de determinar qué conocimiento es relevante para lograr una combinación; esta es quizá la característica más importante de dicho trabajo. Sin embargo, no puede ser considerado como un modelo computacional detallado, en virtud de que no cubre algunos de los mecanismos de la IC y no queda claro si las combinaciones producidas son espacios nuevos con estructuras emergentes o simplemente un mapeo entre los espacios de entrada (Pereira, 2007).

Thagard y Stewart (2010) propusieron un enfoque neurocomputacional basado en mecanismos que vinculan la diversa actividad neural mediante un proceso de convolución; es decir, a través de una operación que interconecta estructuras. La idea principal es combinar diversos patrones neurales, con el objetivo de producir estructuras que quizá sean útiles y novedosas, lo cual es similar a la idea de mezclar conceptos. Quizá la característica más importante de este modelo sea su capacidad para combinar diferentes tipos de representaciones, incluidas las reacciones emocionales. Vale la pena señalar que tales reacciones son un componente clave del pensamiento creativo, en especial la reacción de placer/aprobación que se asocia con la generación de ideas nuevas.

Li, *et al* (2012) abordaron cuestiones relacionadas con la eficiencia en la generación de mezclas y sugirieron un enfoque computacional orientado a metas y al contexto. Su inspiración proviene en especial del trabajo de Brandt y Brandt (2005), quienes estudiaron la construcción de *expresiones semióticas*, un tipo particular de combinación que se usa en el lenguaje para resaltar ciertas características de uno de los espacios de entrada. Los autores propusieron contextos de comunicación (por ejemplo, la comunicación interpersonal o entre grupos pequeños) y metas como la fuerza motivadora detrás de los procesos de selección, proyección y elaboración. Li, *et al* (2012) extendieron esta estrategia a la generación de *conceptos autónomos*, un tipo de combinación en el que no se tiene la intención de transmitir información acerca de los espacios de entrada. Los autores también usaron la terminología propuesta por Johnson-Laird (2002) para distinguir aquellos enfoques computacionales donde todas las mezclas posibles tienen que generarse y probarse de manera individual (*algoritmos neodarwinianos*) de aquellos otros donde algoritmos más eficientes solo generan mezclas correctas al aplicar restricciones para considerar la calidad (*algoritmos neolamarckianos*). Li, *et al* (2012) presentaron dos casos prácticos de programas que implementan una combinación basada en metas y en el contexto. El primero de estos se enfoca en los problemas de proyección selectiva y elaboración; consiste en un sistema que construye artefactos ficticios en historias generadas por computadora. El segundo caso práctico se enfoca de manera principal en la selección de entrada. Es un sistema cuyo objetivo es construir objetos utilizados en un juego simulado que resultan de la combinación de características de un objeto de un mundo de fantasía con un objeto del mundo real.

Martinez, *et al* (2011, 2012) desarrollaron un algoritmo de integración conceptual que toma como base la *Teoría de proyección guiada por heurísticas* de Scherwing, *et al* (2009). Los autores mostraron ejemplos de la potencial aplicabilidad del sistema propuesto en escenarios muy diferentes, como un dominio matemático, acertijos clásicos de racionalidad y combinaciones del tipo sustantivo-sustantivo. Hay que enfatizar que aunque hay una descripción detallada y precisa del sistema, no hay evidencia clara de una implementación.

Uno de los objetivos del proyecto COINVENT (www.coinvent-project.eu) es desarrollar un modelo formal de integración conceptual que sea “computacionalmente” factible y esté inspirado en procesos cognoscitivos. Schorlemmer, *et al* (2014), con base en las ideas de Goguen (2005), proponen una base matemática, usando para ello la *teoría de categorías*. Los morfismos representan relaciones entre las estructuras de los espacios de entrada; por su parte, las mezclas de conceptos corresponden a *colímites*. Además de los casos de combinaciones “óptimas”, donde los espacios de entrada comparten una misma estructura, también se cubren casos con estructuras parciales. Una de las ventajas importantes de este enfoque es que las técnicas utilizadas poseen un alto grado de independencia de un dominio particular, lo cual permite aplicarlo en escenarios muy diferentes. En cuanto a las posibles aplicaciones, el equipo de COINVENT trabaja de manera principal en el razonamiento matemático y la armonización musical.

El modelo formal desarrollado dentro del proyecto COINVENT se relaciona de manera estrecha con la idea de *amalgamación*; es decir, la combinación de varias soluciones de múltiples casos (que se conocen con anterioridad) para obtener un solo resultado; el espacio del resultado contiene tanta información de las soluciones como sea posible. Cuando las soluciones de entrada no pueden combinarse, la amalgamación las generaliza omitiendo algunos de sus detalles (Confalonieri, *et al*, 2015). En vista de que combinar y generalizar soluciones es “computacionalmente” costoso, Confalonieri, *et al* (2015) propusieron un enfoque discursivo para evaluar la calidad de las combinaciones. La idea es usar el *diálogo argumentativo lakatosiano* (Lakatos, 1976) para construir en forma iterativa combinaciones valiosas y novedosas en lugar de un enfoque estrictamente combinatorio; es decir, las combinaciones son evaluadas desde un proceso de argumentación en el cual las particularidades de una mezcla dada se identifican y presentan como temas de discusión. El diálogo argumentativo lakatosiano es un modelo de argumentación que es presentado como un diálogo para describir las diferentes formas en que los matemáticos establecen teorías nuevas.

Dentro del ámbito del proyecto COINVENT, Kutz, *et al* (2012) también presentaron una formalización básica de la IC en la que usaron el *lenguaje de ontología distribuida* (Lange, *et al*, 2012) para especificar diagramas de integración. Este trabajo involucró la traducción de especificaciones escritas en un principio en lenguaje OBJ (Goguen y Malcom, 1996).

4.4 DIVAGO

Divago es uno de los primeros sistemas creativos artificiales basado en el mecanismo de integración conceptual (IC). A pesar de ser uno de los intentos iniciales para modelar “computacionalmente” dicho marco, no puede verse como una solución rudimentaria. De hecho, Divago es el programa más complejo y extenso desarrollado hasta la fecha.

El sistema recibe su nombre por la expresión portuguesa *Eu divago*, que significa “Yo divago”. El nombre enfatiza la importancia del pensamiento divergente en el proceso creativo; es decir, la capacidad para encontrar soluciones inesperadas evitando un razonamiento común. Sin embargo, Divago es más que una implementación de razonamiento divergente; el sistema también encapsula la parte convergente de un proceso creativo. El espacio combinado es el resultado de integrar dos dominios (lo cual es un mecanismo convergente). Además, hasta hoy es el único sistema que utiliza una formalización de los principios de optimalidad para guiar la generación de combinaciones.

La arquitectura de Divago se describe en la figura 4.3.

Como se observa en la figura 4.3, el sistema Divago está compuesto por varios módulos y trabaja con una *base de conocimientos (multidominio)*, que es un depósito dinámico de información dividido en *endominios*, cada uno de los cuales incluye varios tipos de conocimiento: un *mapa conceptual* (conjunto de casos o ejemplos), un conjunto de *reglas* (conjunto de *restricciones de integridad* y un conjunto de *marcos* (Pereira y Cardoso, 2006).

Un *mapa conceptual* constituye una red semántica que denota la relación entre los diversos conceptos que conforman un dominio determinado, el cual, en el marco de la IC, corresponde a los elementos de un espacio mental. La figura 4.4 muestra representaciones de los dominios *Caballo* y *Ave* mediante el uso de redes semánticas. En estos ejemplos se pueden observar relaciones típicas entre elementos como *parte-entero* (pe), *propósito*, *propiedad* (pppd) o *cantidad* (ctd). Por ejemplo, la relación *instance* representa un caso específico del dominio. Y una descripción particular de un caballo es un *ejemplo* del dominio *Caballo*.

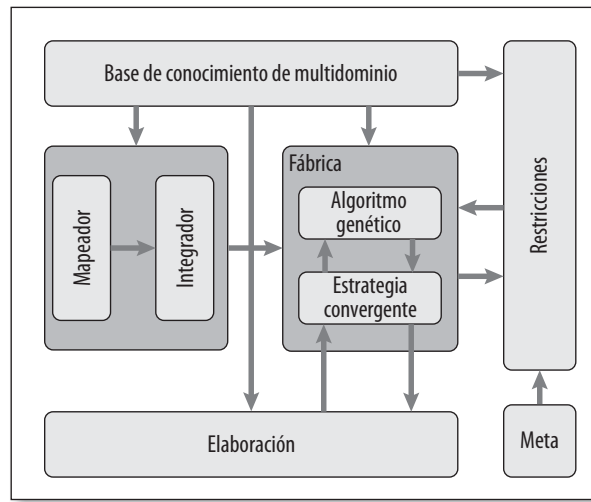


Figura 4.3 Arquitectura de Divago.

Las reglas se usan para representar *conocimiento procedimental*, que es el conocimiento referente a cómo ejecutar una tarea dada. Un ejemplo de una regla es: “Si *X* tiene ruedas, entonces puede rodar”.

Las *restricciones de integridad* se usan para describir eventos o hechos que no pueden ocurrir de manera simultánea.

Los *marcos* son un tipo de conocimiento que abarca un conjunto de condiciones y directrices que definen propiedades de la combinación que se va a generar (por ejemplo, “*X* debe ser azul y redondo”).

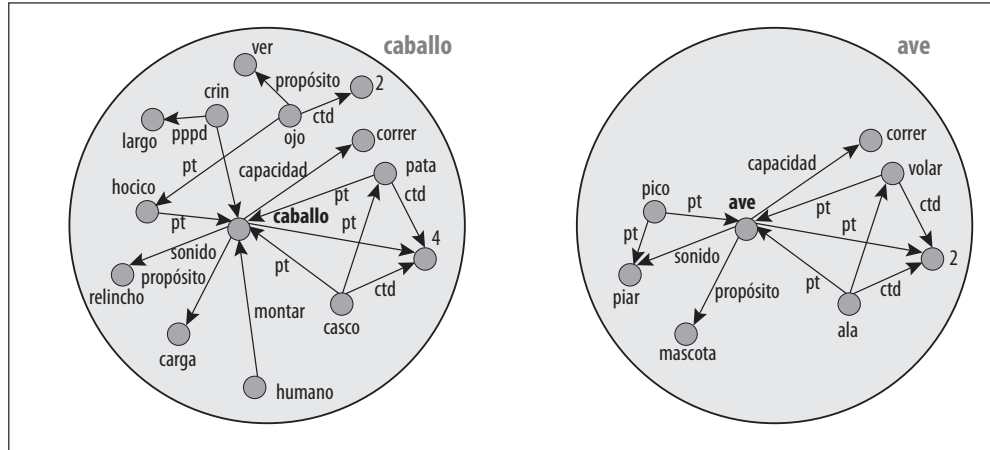


Figura 4.4 Mapas conceptuales de caballo y ave.

El primer paso en el proceso de de creación de nuevos conceptos es la selección del conocimiento inicial, el cual consiste en elegir un par de espacios de entrada (dominios) de la base de conocimiento. En Divago, la selección de dichos espacios bien la lleva a cabo el usuario o bien se genera en forma aleatoria. Luego, el módulo llamado *Mapeador* realiza la selección de aquellos elementos que se proyectarán. Tal selección se logra por medio de un mapeo parcial entre los espacios de entrada, con el uso de un procedimiento u operación que se conoce como *alineación estructural*, que consiste en la búsqueda del par de subgráficos *isomórficos* (estructuralmente equivalentes) más grandes contenidos en los espacios de entrada. Aquí, la equivalencia estructural significa que los gráficos tienen los mismos bordes (relaciones) sin considerar los nodos. La figura 4.5 ilustra un mapeo entre dos dominios, *Caballo* y *Ave*, mediante alineación estructural.

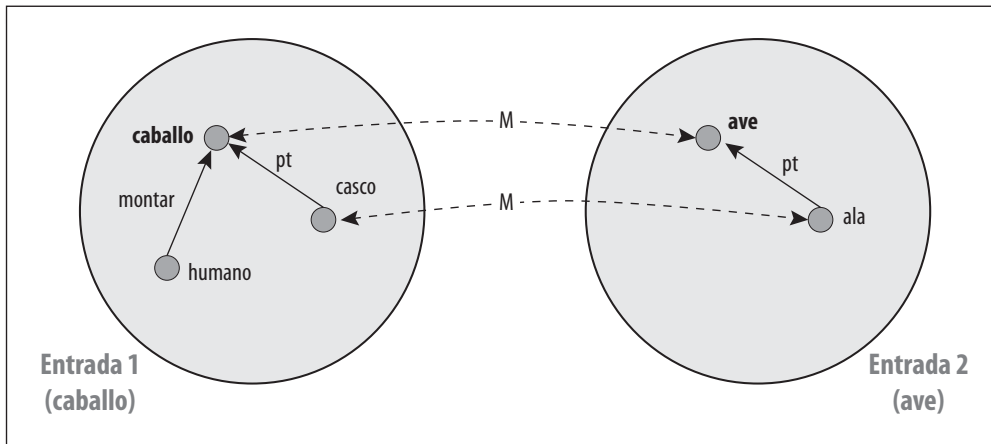


Figura 4.5 Seleccionar elementos para proyección.

Para cada mapeo generado por el *Mapeador*, el *Integrador* ejecuta una proyección en el espacio combinado. Es importante destacar que en esta etapa deben representarse todas las posibles proyecciones, ya que se desea ser lo más exhaustivo posible. Aquí, los nodos son proyectados primero (véase figura 4.6).

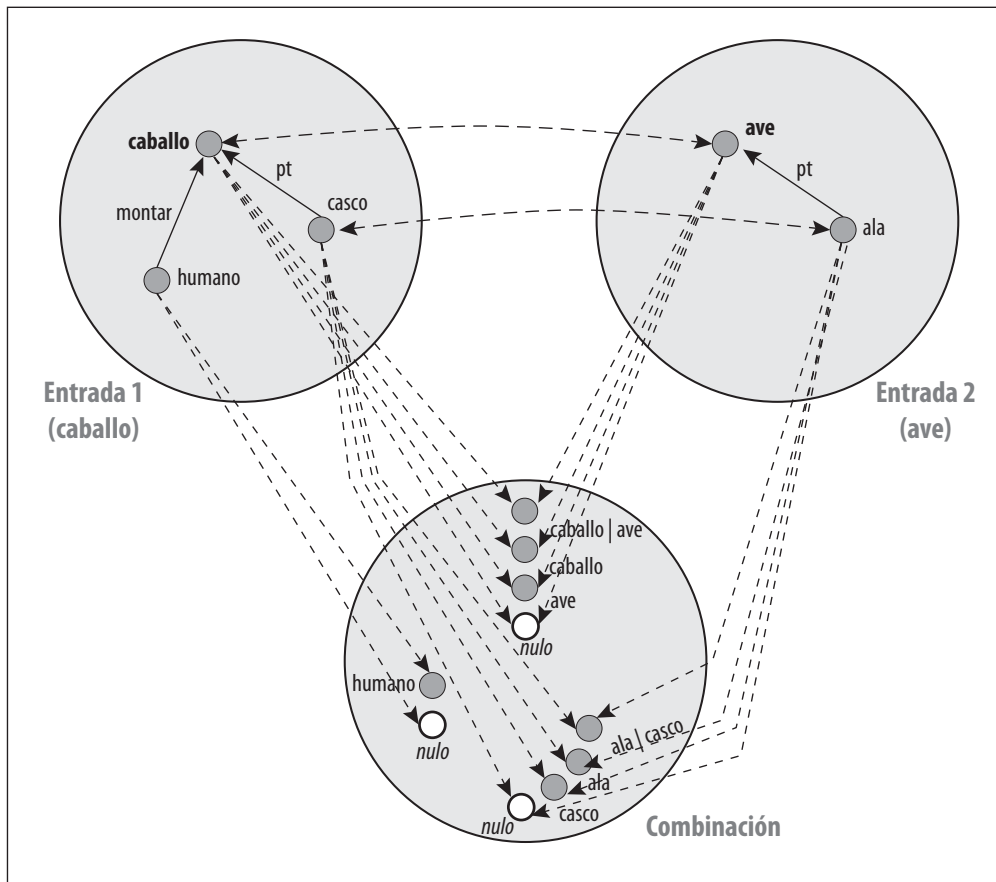


Figura 4.6 Proyección de *nodos* en la combinación.

Por ejemplo, el mapeo “ala” ↔ “casco” tiene cuatro proyecciones alternativas que se describen a continuación.

- ◆ Cada nodo es proyectado como un concepto separado.
 1. Nodos “casco”.
 2. Nodo “ala”.
- ◆ Ningún nodo es proyectado.
 3. Nodo “nulo” en el espacio combinado.
- ◆ Ambos nodos son combinados en un nodo para un concepto nuevo.
 4. Nodo “ala | casco”.

En este caso, cada una de estas cuatro combinaciones puede ser parte de una posible mezcla de conceptos.

A continuación, los elementos restantes también son proyectados desde los espacios de entrada (en este ejemplo, las relaciones), como se describe en la figura 4.7. El conjunto completo de proyecciones resume el conjunto de todas las combinaciones posibles y se denomina *combinoides*. En un ejemplo práctico, el combinoides contiene todas las posibles relaciones, reglas, marcos, casos y restricciones de integridad que pueden presentarse en cualquier combinación de dos espacios de entrada determinados.

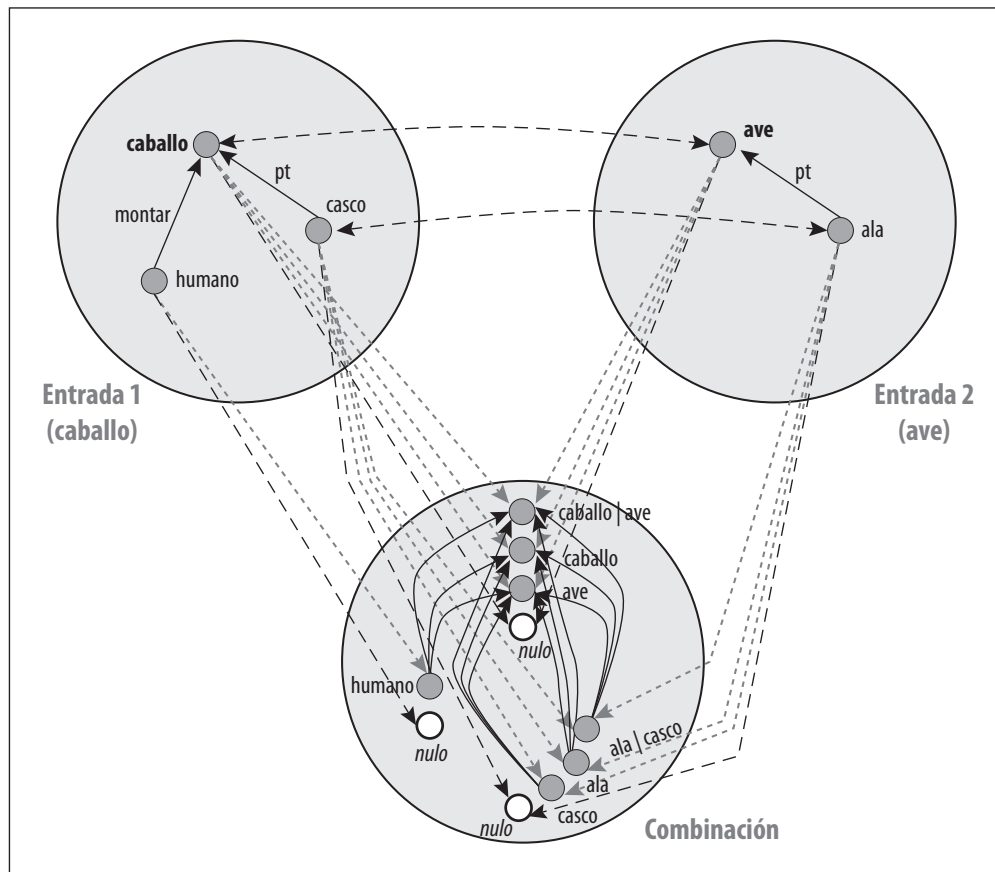


Figura 4.7 Proyección de elementos de relaciones en la combinación.

El módulo *Fábrica* es el responsable de explorar el espacio de todas las combinaciones posibles producidas por el *Integrador*. Asimismo, la *Fábrica* interactúa con los módulos de *Elaboración* y *Restricciones*, cuya relación se basa en un algoritmo genético (AG) que busca las combinaciones que mejor satisfagan los requerimientos dictados por el módulo *Restricciones*. En cada iteración, el AG primero envía una combinación al módulo *Elaboración*, que es responsable de aplicar el conocimiento del contexto en el cual se está trabajando, y luego envía el resultado al módulo *Restricciones*, que aplica los principios de optimalidad y, por consiguiente, provee una forma de evaluar la combinación elaborada. Cuando el AG encuentra una solución adecuada o se ha alcanzado un número predefinido de iteraciones, la *Fábrica* detiene la ejecución del AG y devuelve la mejor combinación.

Ejemplo de la aplicación de Divago

A la fecha, Divago se ha probado en varios dominios. Un ejemplo interesante que ilustra su potencial es el *experimento de generación de criaturas*, cuyo objetivo era investigar el uso de Divago en un contexto de generación de contenido procedimental para un ambiente de juego. La idea que motivó este experimento era producir en forma automática elementos para un juego, como criaturas, vehículos o escenarios, etcétera. El juego resultante tenía una base de conocimiento de dichos objetos (criaturas, objetos físicos, escenarios, etc.) que podía ser utilizada por el sistema. El papel de Divago en la realización del juego era producir criaturas novedosas a partir de un conjunto de criaturas existentes. En su desarrollo se usó un programa para visualizar objetos en 3D creado por (Ribeiro, *et al*, 2003), que es capaz de convertir los mapas conceptuales de Divago, representando a las criaturas en archivos Wavefront OBJ, lo cuales luego pudieran ser visualizados en una computadora.

Durante el experimento, Divago fue alimentado con los mapas conceptuales de tres criaturas: un hombre lobo, un dragón y un caballo, cuyas imágenes 3D se muestran en la figura 4.8; estas criaturas se usaron como espacios de entrada. Ahora bien, en las figuras 4.9 y 4.10 se muestran ejemplos de criaturas híbridas producidas por Divago.

Evaluación de la aplicación de Divago

Divago fue evaluado a través de una serie de ejemplos “clásicos” que se encuentran en la literatura (Pereira, 2007). El objetivo de la evaluación fue entender en qué medida el modelo era capaz de lograr “combinar en forma correcta” los conceptos que se emplean en dichos ejemplos. Durante el proceso, se usaron doce combinaciones diferentes en los experimentos, incluidos “el acertijo del monje budista” (véase capítulo de Mark Turner) y el del “virus de computadora”. Los experimentos se dividieron en dos etapas; primero, se empleó cada restricción de optimalidad de manera aislada y luego se usaron diversas mezclas de dichas restricciones. Esta separación permitió observar cuáles de estas mezclas



Figura 4.8 Criaturas de entrada. De izquierda a derecha: hombre lobo, dragón y caballo.

producían mejores resultados. Al final, Divago consiguió reproducir, o la menos desarrollar, resultados muy similares a los ejemplos prototípicos que se usaron.



Figura 4.9 Criaturas de salida. De izquierda a derecha: caballo-dragón, caballo-hombre lobo y hombre lobo-dragón.

Martins, *et al* (2015) realizaron y presentaron un estudio preliminar acerca de la evaluación de la calidad de las combinaciones visuales, basado en la forma en que los humanos las perciben. Este trabajo es parte de un estudio más amplio que aún se lleva a cabo en el contexto del proyecto ConCreTe (Concept Creation Technologies o Tecnologías de Creación de Conceptos, en español. Para mayor referencia véase la página web: <http://conceptcreationtechnology.eu>), cuyo objetivo fundamental es entender cuáles son las características clave de una buena combinación. Al hallarlas, los autores esperan dar una explicación más comprensible de algunos aspectos poco claros y menos estudiados del mecanismo de integración, el cual tiene un papel fundamental en el pensamiento creativo. Otro de los objetivos de este trabajo es trasladar estos conocimientos al diseño de una nueva versión del sistema Divago. En particular, los autores están interesados en definir estrategias para la selección de espacios de entrada y analizar la relevancia de cada una de las restricciones de optimalidad. En su versión actual, Divago no realiza una selección automática de dichos espacios de entrada; estos son seleccionados por el usuario. En cuanto a las restricciones de optimalidad, debe señalarse que son responsables de definir combinaciones coherentes, pero no dictan si una combinación es creativa o no. La redefinición de las restricciones tiene como propósito la creación de combinaciones de alta calidad que puedan considerarse creativas.



Figura 4.10 Criaturas de salida. De izquierda a derecha: caballo-dragón, caballo-hombre lobo y hombre lobo-dragón.

4.5 CONCLUSIONES

En la actualidad, existe la opinión generalizada de que el diseño de sistemas creativos artificiales constituye una tarea desafiante y compleja. Un argumento que apoya esta idea es, sin duda, el hecho de que hay algunos aspectos de la creatividad que no pueden formalizarse de manera algorítmica, además de que los estudios existentes en la psicología y la ciencia cognoscitiva no tienden a favorecer explicaciones claras acerca del pensamiento creativo. En décadas recientes, los esfuerzos de la investigación interdisciplinaria de la ciencia cognoscitiva y la inteligencia artificial han contribuido con múltiples desarrollos en la creatividad computacional.

En este contexto, el marco de la IC ha sido la base de varios sistemas creativos artificiales interesantes y promisorios, como Divago. A partir del trabajo seminal de Goguen (1999), que introdujo una teoría formal de la integración conceptual, a la fecha se han desarrollado y propuesto varios modelos computacionales que se han usado en el diseño de sistemas creativos.

Aun cuando la integración conceptual no puede verse como una teoría de la creatividad en sí misma, si es posible afirmar que esta constituye una de las pocas explicaciones que ofrece una descripción compleja del mecanismo de integración. Junto con dicha descripción, la teoría de la integración conceptual delinea un conjunto de principios que pueden resultar útiles para el modelamiento de la creatividad. Los sistemas artificiales desarrollados hasta la fecha, en particular Divago, muestran el potencial del marco de la IC en el campo de la creatividad computacional.

Los temas actuales de investigación en el modelado de la IC (por ejemplo, la selección automática de los espacios de entrada o la definición de criterios para finalizar el proceso de elaboración) se relacionan de manera estrecha con el hecho de que en ocasiones la teoría es vaga en aspectos que son decisivos para la comprensión del pensamiento creativo. Creemos que la evaluación de la creatividad puede constituir una parte importante en este esclarecimiento, no solo como una herramienta para evaluar artefactos, sino como algo que ayuda a entender qué hace una buena combinación y cómo se traduce esto en mecanismos como la selección de espacios o de elementos de entrada y la definición de los principios de optimalidad.

REFERENCIAS

1. Brandt, L., Brandt, P. A. (2005). "Making sense of a blend: A cognitive-semiotic approach to metaphor". *Annual Review of Cognitive Linguistics*, 3(1): 216-249.
2. Confalonieri, R., Corneli, J., Pease, A., Plaza, E. y Schorlemmer, M. (2015). "Using argumentation to evaluate concept blends in combinatorial creativity". En *Proceedings of the 6th Int. Conference on Computational Creativity, ICCO-15*.
3. Fauconnier, G. (1994). *Mental Spaces: Aspects of Meaning Construction in Natural Language*. Nueva York: Cambridge University Press.
4. Fauconnier, G. y Turner, M. (1998). "Conceptual integration networks". En *Cognitive Science*, 22(2): 133-187.
5. Fauconnier, G. & Turner, M. (2002). *The Way We Think*. Nueva York: Basic Books.
6. Goguen, J. (1999). "An introduction to algebraic semiotics, with applications to user interface design". En *Lecture Notes in Artificial Intelligence*, volumen Computation for Metaphor, Analogy and Agents, pp. 242-291. Springer.
7. Goguen, J. (2005). "What is a concept?". En Dau, F., Mugnier, M. L. & Stumme, G. (eds.). *Conceptual Structures: Common Semantics for Sharing Knowledge. Proceedings of the 13th International Conference on Conceptual Structures, ICCS 2005, Kassel, Germany, July 17-22, 2005*, volumen 3596 de Lecture Notes in Artificial Intelligence, pp. 52-77. Springer.
8. Goguen, J. & Malcom, G. (1996). *Algebraic Semantics of Imperative Programs*. MIT Press.
9. Guilford, J. P. (1950). "Creativity". En *American Psychologist*, 5(9): 444-454.
10. Johnson-Laird, P. N. (2002). "How jazz musicians improvise". En *Music Perception*, 19(3): 415-442.
11. Keane, M. T. & Costello, F. J. (2001). "Setting limits on analogy: Why conceptual combination is not structural alignment". En Gentner, D., Holyoak, K. & Kokinov, B. (eds.). *The Analogical Mind: A Cognitive Science Perspective*. Cambridge, MASS: MIT Press.

12. Koestler, A. (1964). *The Act of Creation*. Nueva York: Macmillan.
13. Kutz, O., Neuhaus, F., Mossakowski, T. & Codescu, M. (2012). "Blending in the Hub". En *Proceedings of the 5th Int. Conference on Computational Creativity, ICC-14, Ljubljana, Slovenia*.
14. Lakatos, I. (1976). *Proofs and refutations: the logic of mathematical discovery*. UK: Cambridge University Press.
15. Lange, C., Kutz, O., Mossakowski, T. & Griinger, M. (2012). "The distributed ontology language (dol): Ontology integration and interoperability applied to mathematical formalization". *CoRR*, abs/1204.5093.
16. Li, B., Zook, A., Davis, N. & Riedl, M. (2012). "Goal-driven conceptual blending: A computational approach for creativity". En Maher, M. L., Hammond, K., Pease, A., Perez, R., Ventura, D. & Wiggins, G. (eds.). *Proceedings of the Third International Conference on Computational Creativity*, pp. 9-16, Dublín, Irlanda.
16. Martínez, M., Besold, T. R. & Abdel-Fattah, A. (2011). "Towards a domain-independent computational framework for theory blending". En *Proceedings of the AAAI Fall Symposium on Advances in Cognitive Systems*, pp. 210-217.
18. Martínez, M., Besold, T. R., Abdel-Fattah, A., Gust, H., Schmidt, M., Krumnack, U. & Kuehnberger, K. U. (2012). "Theory blending as a framework for creativity in systems for general intelligence". En *Theoretical Foundations of Artificial General Intelligence*, pp. 219-239. Atlantis Press.
19. Martins, P., Urbancic, T., Pollak, S., Lavrac, N. & Cardoso, A. (2015). "The good, the bad, and the aha! blends". En *Proceedings of the 6th Int. Conference on Computational Creativity, ICC-15*.
20. Pereira, F.C. (2005). *Creativity and AI: A Conceptual Blending approach*. Tesis doctoral, University of Coimbra.
21. Pereira, F.C. (2007). *Creativity and Artificial Intelligence: A Conceptual Blending Approach*. Berlín: Mouton de Gruyter.
22. Pereira, F.C. & Cardoso, A. (2006). "Experiments with free concept generation in Divago". *Knowledge Based Systems*, 19(7): 459-471.
23. Ribeiro, P., Pereira, F.C., Marques, B., Leitao, B. & Cardoso, A. (2003). "A model for creativity in creature generation". En *4th International Conference on Intelligent Games and Simulation (GAME-ON 2003)*.
24. Schorlemmer, M., Smail, A., Kuehnberger, K.-U., Kutz, O., Colton, S., Cambouropoulos, E. & Pease, A. (2014). "COINVENT: Towards a computational concept invention theory". En *Proceedings of the 5th Int. Conference on Computational Creativity, ICC-14, Ljubljana, Slovenia*.
25. Schwering, A., Krumnack, U., Kuehnberger, K.U. & Gust, H. (2009). "Syntactic principles of heuristic-driven theory projection". En *Journal of Cognitive Systems Research*, 10(3): 251-269.
26. Thagard, P. & Stewart, T.C. (2010). "The AHA! experience: Creativity through emergent binding in neural networks". En *Cognitive Science*, 35(1): 1-33.
27. Veale, T. (1995). *Metaphor, Memory and Meaning: Symbolic and Connectionist Issues in Metaphor Interpretation*. Tesis doctoral, Dublin City University.
28. Veale, T. & O'Donoghue, D. (2000). "Computation and blending". En *Cognitive Linguistics*, Special Issue on Conceptual Blending: 253-282.

