

CARTOGRAFÍA DEL CONOCIMIENTO

JUAN PABLO CÁRDENAS

FABIOLA CABRERA

GRACIELA MOGUILLANSKY

GASTÓN OLIVARES

SERIE DE ESTUDIOS

N°2

Los autores agradecen al CNID por haber entregado la oportunidad de realizar este estudio y la crítica inteligente y constructiva, así como los aportes y comentarios de Adrián Palacios (U. de Valparaíso, ISCV), Carla Taramasco (U. de Valparaíso), Jorge Gibert (U. de Valparaíso), Miguel Fuentes (U. San Sebastián, ISCV), Patricia Muñoz (Programa de Información Científica-CONICYT) y Soledad Bravo Marchant (Programa de Información Científica-CONICYT), así como de los asistentes a los seminarios realizados por el CNID para la presentación de este informe. También se agradece al Programa de Información Científica de CONICYT por los datos facilitados. Los resultados y conclusiones del informe son sólo responsabilidad de los autores.



Esta obra está licenciada bajo la Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visite <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Usted es libre de copiar, distribuir la obra en cualquier medio o formato. Todo ello a condición de le de el crédito a esta obra de manera adecuada, proporcionando un enlace a la licencia, e indicando si se han realizado cambios. Puede hacerlo de cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo del licenciante. Además, el material no se use con propósitos comerciales y no se produzcan obras derivadas sobre la obra original.

La Serie Estudios de la Secretaría Ejecutiva del Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo busca entregar información que permita avanzar en el diseño consensuado de estrategias de largo plazo en materia de ciencia, tecnología e innovación para el desarrollo de nuestro país.

A continuación presentamos el estudio encargado al Instituto de Sistemas Complejos de Valparaíso que busca identificar la estructura de relaciones del conocimiento científico chileno para identificar su complejidad y potencial evolución.

Índice

Resumen Ejecutivo	1
Introducción	4
A. Hacia la definición y construcción de la cartografía de conocimiento en Chile	5
I. Los sistemas complejos	5
II. Hacia la construcción de la cartografía del conocimiento	7
1. Producción e Impacto científico-disciplinar en Chile	7
2. Dependencia histórica y geográfica del conocimiento en Chile	12
III. Cartografía del conocimiento en Chile	20
1. Construcción de la cartografía	20
2. Análisis de la cartografía	24
B. La cartografía como herramienta de comparación	29
I. Producción científica comparada en tres países: Chile, Finlandia y Nueva Zelanda	30
II. Cartografía del conocimiento, estudio comparado	36
III. Complejidad del sistema conocimiento, estudio comparado	41
C. Potencialidades del Sistema de Conocimiento Nacional	47
I. Complejidad inducida por potencialidad	47
II. Complejidad inducida por optimización	52
D. Conclusiones	56
Referencias	59



CARTOGRAFÍA DEL CONOCIMIENTO EN CHILE

Juan Pablo Cárdenas

Fabiola Cabrera

Graciela Moguillansky

Gastón Olivares

Mediante el enfoque de las ciencias de la complejidad, la investigación “Cartografía del conocimiento en Chile”, caracteriza, por primera vez y de forma exploratoria, la estructura de relaciones del conocimiento científico nacional. La hipótesis de la investigación se basa en que las relaciones de complementariedad del sistema científico disciplinar chileno son las que explican su grado de complejidad, condicionando también su evolución. El enfoque sistémico adoptado, releva la forma particular en la cual el conocimiento científico se vincula en Chile para generar capacidades para investigar. Así, la potencialidad del conocimiento científico nacional reside en sus vínculos.

La comparación de la “Cartografía del conocimiento chileno” con aquellas de Finlandia y Nueva Zelanda, muestra una estructura de relaciones centrada en vínculos disciplinares ligados a la explotación de recursos naturales y con indicadores de complejidad o sofisticación inferiores a ambos países. Por otro lado, la particularidad de la cartografía chilena sugiere que su dinámica “natural” no lo conducirá necesariamente a un estado de complejidad como el observado en países desarrollados. Muy por el contrario, su dinámica lo haría profundizar más en lo ya existente. La alternativa, como ha ocurrido en países con conocimiento de frontera, es la aplicación de políticas de investigación y desarrollo y de incentivos para la demanda de nuevo conocimiento, más activos y dirigidos que los prevalientes en la actualidad.

Valparaíso, 16 de septiembre de 2015

Resumen Ejecutivo

Este documento expone los resultados de la investigación “Cartografía del conocimiento en Chile” que abre camino a la caracterización de la estructura del conocimiento científico nacional, así como a establecer una mirada evolutiva de los elementos que contribuyen a su conformación.

Comprender cómo evoluciona y se articula la capacidad nacional para generar conocimiento, permite identificar potenciales del saber científico que en el futuro pueden ser traducidos en nuevos procesos y productos, así como contribuir al diseño de políticas para el fomento de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación.

El estudio se realizó con una mirada sistémica, donde las relaciones entre disciplinas del conocimiento científico son las protagonistas de la llamada cartografía del conocimiento chileno. En lugar de analizar cada área disciplinaria y su evolución en particular, como entidades estancas y desvinculadas, se tomó en cuenta el todo en su complejidad. La hipótesis tras esta aproximación considera que las relaciones de complementariedad del sistema científico disciplinar chileno, engendrarían propiedades que no son observables en las disciplinas miradas en forma independiente o como suma de las mismas. Por otro lado, esas mismas relaciones son las que condicionan su evolución.

La comparación de la cartografía del conocimiento chileno con aquellas de Finlandia y Nueva Zelanda, dos países de interés que han sido utilizados como *benchmark* en varias áreas de la tecnología y del conocimiento, ha permitido a su vez evaluar el grado de complejidad del sistema de conocimiento científico en Chile. Para ello se elaboraron indicadores y se desarrolló una metodología para el análisis de la sofisticación del sistema de conocimiento científico nacional.

La comparación permitió evidenciar que Chile presenta indicadores de complejidad o sofisticación inferiores a ambos países. En Finlandia, la generación de nuevo conocimiento habría superado el alto costo de producción característico de las primeras etapas, ya que se encuentra en las fases de reproducción y distribución de este. No sería el caso chileno ni el neozelandés. Ello hace preguntarse acerca del papel de la política pública en esta etapa del conocimiento y los incentivos necesarios para mitigar dicho costo.

El estudio evidencia que en el núcleo del conocimiento científico chileno (determinado a partir de la cercanía topológica entre disciplinas en la cartografía) se encuentran varias disciplinas científicas relacionadas con los recursos naturales, tales como Ciencias Medio Ambientales, Ecología, Biodiversidad, Ciencias del Mar y de la Tierra, disciplinas Agrícolas, Mineras y Ciencias de la Ingeniería. En Chile, al igual que en América Latina, los sectores productivos asociados a la explotación de recursos naturales han sido poco intensivos en generación de conocimiento, a diferencia de países intensivos en recursos naturales que lograron desarrollarse y cuyas compañías invirtieron en investigación y desarrollo (I+D) en importantes laboratorios (Niosi, 2000). Una situación similar a la detectada a nivel país, aparece a nivel regional. El estudio detectó que la producción científica disciplinar de las regiones de Chile, medida por el número de investigadores afiliados a la región y por el número de artículos, coincide con áreas productivas regionales, como por ejemplo Botánica y Agricultura Multidisciplinar en el Maule, o Metalurgia y Minería en Atacama, asociadas también a los recursos naturales. De lo anterior se puede entender

la coincidencia, mostrada en este estudio, entre la complejidad del sistema de conocimiento científico nacional y la complejidad económica (Hausmann *et al.*, 2014) de su sector productivo. Lo anterior permite plantear la hipótesis sobre la existencia de un estrecho vínculo entre el sector productivo y la generación de conocimiento.

El estudio muestra además que, aun cuando Nueva Zelanda presenta una estructura productiva similar a la chilena, la complejidad de su sistema de conocimiento científico es superior. Esto lleva a pensar en el impacto de políticas de I+D para la sofisticación del sistema de conocimiento, que en el caso de Nueva Zelanda han sido más efectivas.

El estudio también sugiere que no sólo importan los niveles de producción o la calidad de la investigación realizada en Chile, ambos aspectos bien logrados en muchos casos, sino que debe tomarse especialmente en cuenta la forma en la cual el conocimiento se vincula para generar nuevas capacidades para investigar. La potencialidad del conocimiento científico está en sus vínculos y, por lo tanto, las políticas debieran favorecerlos.

La comparación con un caso como Finlandia evidencia que se requieren nuevos desafíos del aparato productivo chileno, que al traducirse en preguntas para la ciencia, den paso a núcleos interdisciplinarios capaces de generar las respuestas requeridas, de esta forma se retroalimentaría la complejidad del sistema productivo y del conocimiento. Si esto es así, una batería de políticas que estrechen el vínculo entre la industria y/o servicios productivos y la academia, pasa a ser fundamental para la sofisticación del sistema de conocimiento científico en Chile.

El hecho de que la cartografía de Chile muestre una escasa densidad de vínculos, incluso en el núcleo del sistema, también sugiere la hipótesis de posibles fallas de políticas en el sistema de ciencia y tecnología chileno. Sin ahondar mucho en el tema, la falta de incentivos a la investigación colaborativa e interdisciplinar, derivada, entre otras causas, de las actuales reglas establecidas para el financiamiento de la investigación en las universidades, es un factor que no se puede obviar. Por otra parte si es a través de los centros de excelencia que ocurre la investigación interdisciplinaria, fenómeno que amerita también una investigación, las recomendaciones de política irían a fortalecer el financiamiento de los mismos.

El mirar y entender el conocimiento científico como parte de un Sistema Complejo Adaptativo arroja tal vez uno de los resultados más interesantes que sugiere que la dinámica “natural” del sistema de conocimiento chileno no lo conducirá necesariamente a un estado de complejidad como el observado en países desarrollados, denso en vínculos y con alta capacidad de generar nuevas áreas de conocimiento. Muy por el contrario, su dinámica lo haría profundizar más en lo mismo, debido a mecanismos de ventaja acumulativa que opacarían la exploración del sistema. Esperar, más o menos tiempo, a que el sistema científico se complejice en una dirección como la de Finlandia, por su propia cuenta, no parece pertinente, por lo que la alternativa —como ha ocurrido en países con conocimiento de frontera— es la aplicación de políticas de investigación y desarrollo y de incentivos para la demanda de nuevo conocimiento, más agresivos y dirigidos que los prevalecientes en la actualidad.

El estudio sugiere algunas alternativas para aumentar la complejidad del sistema. Ello puede ser obtenido con la potenciación de algunos pocos enlaces estratégicos, tomando en cuenta criterios tales como: (i) la coyuntura del país en un momento determinado (p.e., necesidad de investigar sobre recursos hídricos donde vínculos disciplinares como “Recursos Hídricos ⇌ Ingeniería Ambiental” parecen importantes); (ii) la investigación aplicada ya desarrollada en el país (p.e., usar la dependencia geográfica detectada entre la ciencia y los sectores productivos

Serie Estudios

de una región, sería un criterio para potenciar vínculos como “Pesca ↔ Oceanografía”); o (iii) experiencias exitosas en el patentamiento vegetal donde vínculos como “Botánica ↔ Bioquímica y Biología Molecular” parecen tener potencial.

No obstante, cualquier intento por complejizar el sistema de conocimiento científico no será efectivo si no encuentra recepción en el sistema productivo. Lo mismo aplica en el sentido contrario.

Finalmente, esta investigación ha abierto nuevos temas de investigación. Uno de ellos tiene que ver con el perfeccionamiento de la metodología propuesta en esta investigación como una primera aproximación al análisis del sistema de conocimiento científico. Por otro lado, queda pendiente profundizar en la relación entre las áreas de investigación científicas o las disciplinas, y los desarrollos de la investigación aplicada, lo que podría analizarse con los cruces de la base de datos de producción científica y las de CORFO INNOVA o FONDEF. En la misma línea se hace urgente estudiar la actual y real vinculación entre la investigación y el sector productivo nacional.

Por otro lado, parece interesante analizar los aportes a la complementación del conocimiento que están realizando los Centros de Excelencia nacionales y, extranjeros, los Institutos de Investigación Milenio, los Centros con financiamiento Basal y FONDAP de CONICYT, entre otros.

Una tercera área de investigación que se desprende de este estudio, es la real vinculación existente entre la academia y la industria. Si se revisara no sólo la investigación aplicada sino también los diversos aspectos que enlazan ambos mundos, se tendría un diagnóstico más cercano sobre las debilidades y fortalezas de este enlace, lo que podría iluminar sobre las condiciones, bajo las cuales, la academia en conjunto con la empresa puedan generar una dinámica virtuosa para la investigación científica y la innovación.

Las ciencias de la complejidad, a través de sus herramientas analíticas, aplicadas al análisis de los sistemas de conocimiento nacional representa en sí un elemento de innovación, único en Chile, y cuya repercusión puede resultar de alto impacto al momento del diseño de políticas públicas que tiendan a promover el desarrollo del sector productivo en áreas deficitarias.

Introducción

Chile es un país que se ha desarrollado gracias a sus riquezas naturales. La producción minera, agrícola y marítima ha sido el pilar de su economía.

Sin embargo, a pesar de sus riquezas, no ha podido aprovechar sus ventajas competitivas, incorporando conocimiento y valor a la producción para avanzar hacia una “economía del conocimiento”. Esto queda en evidencia en la observación realizada por Hausmann *et al.* (2014), cuantificada según el Índice de complejidad Económica para las naciones, que da cuenta del grado de diversidad y exclusividad en su producción. Finlandia, por ejemplo, pasó del lugar 11 en el año 1964, al lugar número 4 en 2008. Hoy, es uno de los países innovadores por excelencia. Por el contrario, Chile cayó del lugar 36 al 52 en ese mismo período. Este fenómeno debiera tener alguna incidencia en el desarrollo del sistema científico nacional.

Mediante el enfoque de las ciencias de la complejidad y para avanzar de forma exploratoria en esta y otras interrogantes, la investigación “Cartografía del conocimiento en Chile” caracteriza, por primera vez, la estructura de relaciones del conocimiento científico nacional. Este estudio se basa en que las relaciones de complementariedad del sistema científico disciplinar chileno serían reflejo de los requerimientos para generar capacidades de investigación.

Los resultados de esta investigación lo corroboran. El aumento en la producción científica nacional en la última década (de acuerdo a la Base de Datos ISI-Web of Science) es efectivo y muy beneficioso. Sin embargo, no sería más que el reflejo de un sistema productivo con baja demanda por conocimiento sofisticado ya que la articulación del conocimiento científico en Chile es débil, simple y con limitadas perspectivas, a pesar de que en muchos casos la investigación científica realizada es de primer nivel. Lo que este estudio muestra es que no sólo importan los niveles o la calidad de la investigación realizada, sino que debe tomarse especialmente en cuenta la forma en la cual un tipo de conocimiento se vincula con otro para generar uno nuevo. La potencialidad del conocimiento científico está en sus vínculos.

Para validar esta hipótesis, este estudio utiliza herramientas de las ciencias de la complejidad. Un paradigma multidisciplinar que busca, tras mecanismos universales y fundamentales, la comprensión de fenómenos dentro de los cuales están la economía, la sociedad y también el conocimiento a través de la historia de sus relaciones mutuas.

El informe está estructurado de la siguiente forma: en la primera sección se introduce la ciencia de la complejidad y se define y construye la cartografía de conocimiento para Chile. En la segunda sección, se desarrolla la comparación de la cartografía de Chile con las de Nueva Zelanda y Finlandia en términos de su complejidad. Finalmente, en la última sección se estudia —a partir de la cartografía— su capacidad para dar cuenta de la capacidades del sistema de conocimiento nacional.

A. Hacia la definición y construcción de la cartografía de conocimiento en Chile

I. LOS SISTEMAS COMPLEJOS

Definir complejidad no es algo trivial. Más difícil aún, cuantificarla. Varias definiciones han sido propuestas a la fecha, así como formas de medirla (Gell-Mann, 1994; Kauffman, 1995; Adami, 2002; Fullsack, 2011). Es por eso que más que una definición, conviene señalar que cuando se habla de complejidad se hace referencia a un fenómeno transversal, profundamente enraizado en las leyes de la naturaleza (Nicolis & Rouvas-Nicolis, 2007), que parece ir aumentando espontáneamente en sistemas alejados del equilibrio (Lineweaver, Davies & Ruse, 2013). Estos sistemas se ubican, según Gell-Mann (1994), en un continuo entre el orden y el desorden, razón por la cual tienen propiedades de ambos extremos.

Las llamadas ciencias de la complejidad reúnen una serie de disciplinas científicas que comenzaron a desarrollarse desde la década de los 40 y 50 en distintas ramas para su estudio y comprensión (Fig. 1).

Una de las ramas, derivada de la Teoría de Sistemas y la Cibernética, es la llamada **Teoría de sistemas complejos** (rama amarilla del mapa de la Figura 1). Se diferencia de las otras porque su foco está puesto en la complejidad que emerge de las interacciones entre las unidades que componen un sistema. Dentro del estudio de los sistemas complejos destacan los trabajos de los chilenos Humberto Maturana y Francisco Varela en la década de los 70 (Maturana & Varela, 1973), en fenómenos relacionados con la auto organización y adaptación de los sistemas vivos. Hacia fines de los 90 y comienzos del nuevo siglo, en esa misma línea, destaca por su impacto y transversalidad la llamada Ciencias de las redes complejas (*Network Science*).

Los trabajos pioneros sobre redes complejas de Albert-Lazlo Barabási (Barabási & Albert, 1999; Barabási, Albert & Jeong, 2000), Mark Newman (Newman, 2003), Steven Strogatz y Duncan Watts (Watts & Strogatz, 1998; Strogatz, 2001), entre muchos otros, fueron determinantes en la comprensión sobre la estructura de relaciones de los sistemas complejos, así como en los efectos que esta tenía sobre las propiedades del sistema. Sus trabajos pusieron en evidencia que dicha estructura “esconde” información respecto a las propiedades de este. Relaciones jerarquizadas, de naturaleza no lineal, de distinto peso, entre otras particularidades, serían las responsables de una serie de propiedades “complejas” que evidencian la presencia de un particular orden al interior de estos sistemas. Por otro lado, mostraron que dicha estructura era común a sistemas complejos de distinta naturaleza. Fue esta universalidad la que llamó la atención de la comunidad científica que se volcó al estudio y aplicación de las llamadas redes complejas a la comprensión de distintos fenómenos naturales tales como la movilidad humana (Pentland, 2014), la ecología (Montoya, Pimm & Solé, 2006), la colaboración científica (Newman, 2004) y la economía (Hidalgo, Klinger, Barabási & Hausmann, 2007; Hidalgo, 2015). La clásica mirada reduccionista, centrada en las propiedades de los elementos de un sistema, fue reemplazada por una mirada sistémica centrada en las relaciones, y los patrones que de ellas emergen (Buchanan, 2007).

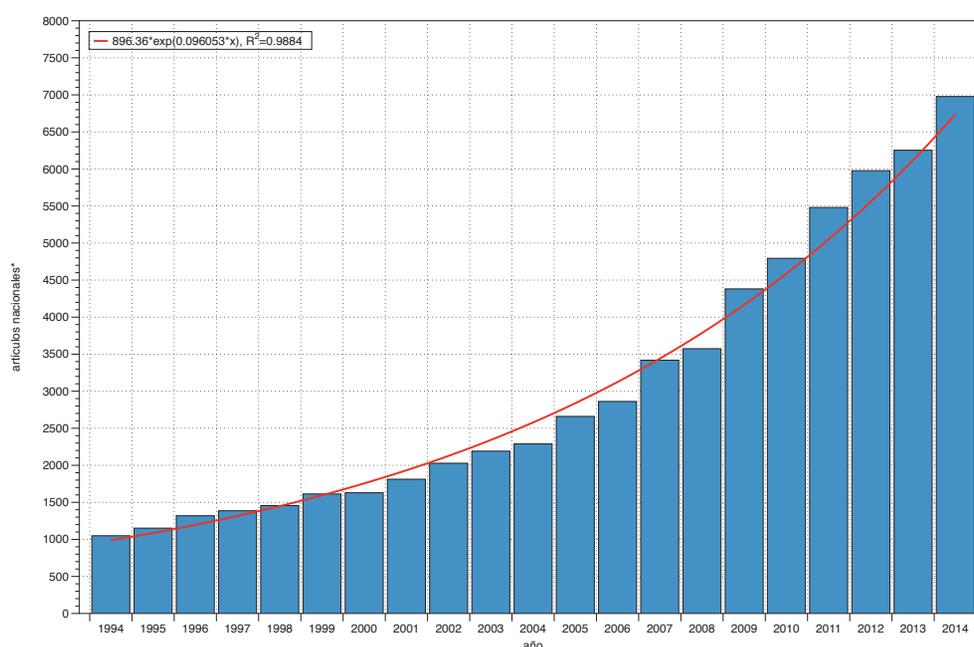
II. HACIA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CARTOGRAFÍA DEL CONOCIMIENTO

1. Producción e Impacto científico-disciplinar en Chile

El análisis de la producción científico-disciplinaria de Chile se realiza en este estudio¹ en dos de sus dimensiones: la producción (medida como el número de artículos científicos por disciplina) y el impacto de las disciplinas científicas desarrolladas en el país (medido por el número de citas). La base de datos utilizada para el análisis se describe en el Cuadro Explicativo I.

Un primer resultado indica un fuerte incremento en el número total de artículos nacionales en las dos últimas décadas (Fig. 2).

Figura 2. Número de artículos nacionales publicados en los últimos 20 años



Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

Lo anterior puede ser atribuido a diversos factores tales como el desarrollo de las tecnologías de información, planteado por ejemplo por Cárdenas *et al.* (2014) al analizar la co-autoría de artículos científicos en la región de Valparaíso. O bien, a las fuentes de financiamiento disponibles y al mismo dinamismo de la educación superior nacional, como también a la aparición de redes de soporte internacional de colaboración sobre temas específicos.

¹ Este estudio no tiene por objetivo profundizar en este tipo de análisis, donde la Cienciometría ha hecho importantes contribuciones (ver por ejemplo "Principales indicadores cienciométricos de la actividad científica chilena 2012. Informe 2014: Una mirada a 10 años", de Scimago Lab, 2014).

Sobre los datos utilizados

El estudio presentado en este informe utiliza como datos de análisis los **artículos nacionales**¹ de la base de datos de ISI Web of Science ® (WoS) de Thomson Reuters para el período 2004-2014². Las razones para escoger esta base de datos por sobre otras tiene que ver con que el análisis se centra en las **disciplinas científicas**, siendo WoS aquella que ha trabajado de mejor manera este aspecto³, por sobre Scopus ® y SciElo - Chile ®. Además, las categorías disciplinarias de WoS tienen homologación OECD, lo que permite un mayor alcance de este estudio.

Es importante aclarar que en la base de datos escogida, las publicaciones en humanidades y ciencias sociales están menos representadas que las de las ciencias naturales y las ingenierías, sin embargo es algo que también sucede con Scopus (Fingerman, 2006). Esta condición inicial del estudio representa una disparidad real de la producción científica mundial a favor de las ciencias naturales y las ingenierías (UNESCO, 2010).

Finalmente, no considera la base de datos SciElo-Chile, ya que su tamaño es mucho menor que WoS y la gran mayoría de revistas importantes contenidas en SciElo, también lo están en WoS. Es necesario remarcar que para otro tipo de análisis, como por ejemplo uno centrado exclusivamente en el impacto de las publicaciones, Scopus, de mayor cobertura que WoS, puede ser una mejor alternativa.

1 *Al menos uno de los autores del artículo tienen afiliación a una institución chilena.*

2 *Todos los resultados, así como las conclusiones de este estudio, deben ser entendidos desde esta condición inicial definida por la base de datos utilizada.*

3 *Programa de Información Científica de CONICYT.*

Cuadro 1
Listado de las 25 disciplinas con mayor número de publicaciones en Chile, período 2004-2014

DISCIPLINA WOS	SUMA TOTAL
ASTRONOMÍA Y ASTROFÍSICA	5819
MEDICINA GENERAL Y INTERNA	1896
ECOLOGÍA	1766
BIOLOGÍA MARINA	1745
BIOQUÍMICA Y BIOLOGÍA MOLECULAR	1544
MATEMÁTICAS APLICADAS	1368
CIENCIAS DEL MEDIO AMBIENTE	1216
MATEMÁTICAS	1205
QUÍMICA MULTIDISCIPLINAR	1122
FÍSICO QUÍMICA	1114
BOTÁNICA	1018
TECNOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS	938
FÍSICA DE PARTÍCULAS Y CAMPOS	917
ECONOMÍA	903
OCEANOGRAFÍA	860
ZOOLOGÍA	833
NEUROCIENCIAS	830
CIENCIAS MULTIDISCIPLINARIAS	817
GEOCIENCIAS, MULTIDISCIPLINAR	809
BIOTECNOLOGÍA & MICROBIOLOGÍA APLICADA	794
FÍSICA MULTIDISCIPLINAR	790
INGENIERÍA QUÍMICA	769
CIRUGÍA	719
INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA	712
CIENCIA DE LOS MATERIALES MULTIDISCIPLINAR	710

Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI

Al analizar el detalle de los niveles de producción de las disciplinas, se observa que el número de artículos se distribuye de forma muy desigual entre las 249 disciplinas WoS desarrolladas en Chile² hasta 2014 (Cuadro 1). De hecho, sólo el 10% de las disciplinas con mayor número de publicaciones concentra casi el 50% del total de publicaciones en la última década. Dentro de estas disciplinas altamente productivas, dominan aquellas pertenecientes a las ciencias naturales con el 70% de las publicaciones. En menor medida aportan a estas disciplinas “súper productivas”, las publicaciones en medicina e ingeniería. De las ciencias sociales, sólo economía se encuentra en este grupo.

Entre las causas de lo anterior, Becher (1994) señala que las disciplinas tienen distinto comportamiento a la hora de publicar. Esto respondería a varias razones, desde cómo los investigadores que las desarrollan se plantean frente a la sociedad, cómo se organizan los distintos departamentos, hasta cómo se trabaja dentro del laboratorio o departamento. Esto hace que, por ejemplo, la química tenga una práctica asociada a un mayor número de publicaciones (breves) que la filosofía, la cual en general se difunde a través de libros.

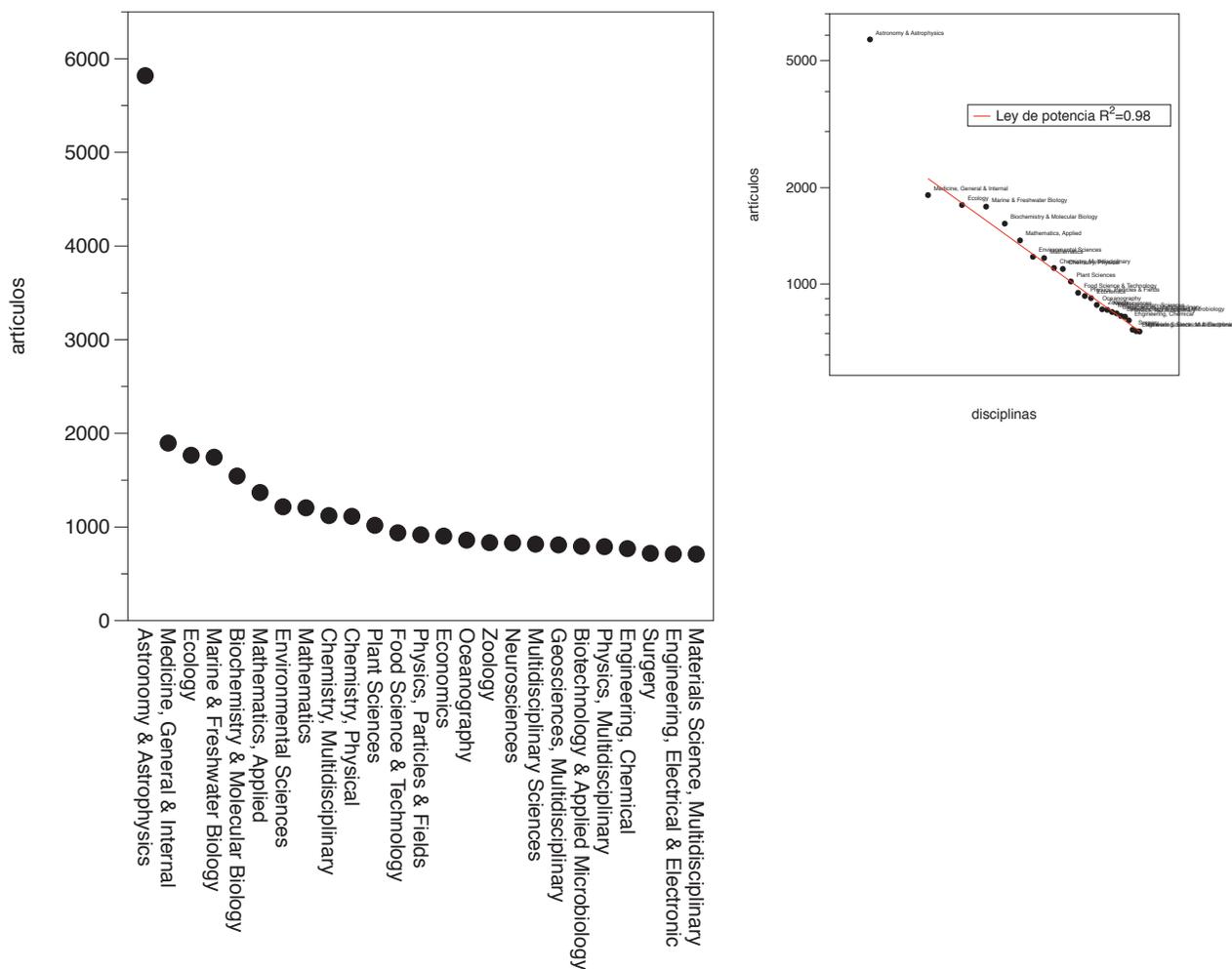
Desde la óptica de los sistemas complejos, esta desigualdad en los niveles de producción responde a mecanismos propios de la complejidad en el sistema de producción científica nacional. Los sistemas complejos se caracterizan por este tipo de “injusticia” y desigualdad, potenciada por mecanismos bastante estudiados como la ventaja acumulativa (Merton, 1968; Barabási & Albert, 1999; Taleb, 2010), también conocido como Efecto Mateo (Scimago Lab, 2014), donde una casualidad, una política institucional o gubernamental o incluso la misma historia, pueden poner a una disciplina en un momento determinado en una condición más favorable y luego, al pasar el tiempo, la probabilidad de publicar en esa disciplina o tener mayor impacto, aumenta. Por el contrario, disciplinas no favorecidas mirarán cada vez de más lejos a las dominantes.

Lo anterior se hace aún más evidente cuando se analiza la distribución de publicaciones por disciplina en la Figura 3, sobre todo al observar el carácter *outlier* de “astronomía y astrofísica”. Sin embargo, hay un fenómeno más llamativo, ilustrado en la gráfica de la derecha de la misma figura: el resto de las disciplinas distribuye su producción de acuerdo a una ley de potencia. Esto significa que la diferencia entre la producción de la primera disciplina con la segunda, es la misma que tiene la segunda con la tercera, la tercera con la cuarta y así sucesivamente. Este comportamiento, típicamente observado en sistemas complejos, es producido por mecanismos como la ventaja acumulativa antes mencionada y pone en evidencia un particular ordenamiento del sistema, del cual la disciplina “astronomía y astrofísica” no participa. Se volverá sobre este tema más adelante.

Por otro lado, la Figura 4 muestra un notorio aumento en el número de citas que tuvieron los trabajos científicos nacionales en el período 1994-2002 (zona verde). No obstante, a partir de ese momento, el número de citaciones para artículos nacionales parece haber encontrado un nivel máximo de impacto en torno a las 50.000 citas anuales. Ahora, si se considera el aumento en el número de publicaciones nacionales en la última década (Fig. 2), parece ser que el impacto de estas publicaciones ha disminuido. De todas formas, es necesario mencionar que las citaciones son dependientes, entre otros factores (Lotka, 1926; Merton, 1968; Price, 1965, 1976), incluido la viabilidad o generalidad del conocimiento e incluso el azar (Taleb, 2010), del tiempo que lleva “visible” una publicación para ser citada. Sería por esto último que se observa en la figura, un menor número de citaciones a las publicaciones nacionales en años recientes (zona azul).

2 Hasta 2014 sólo dos disciplinas: “Literatura Eslava” y “Danza”, nunca fueron desarrolladas en el país en artículos científicos.

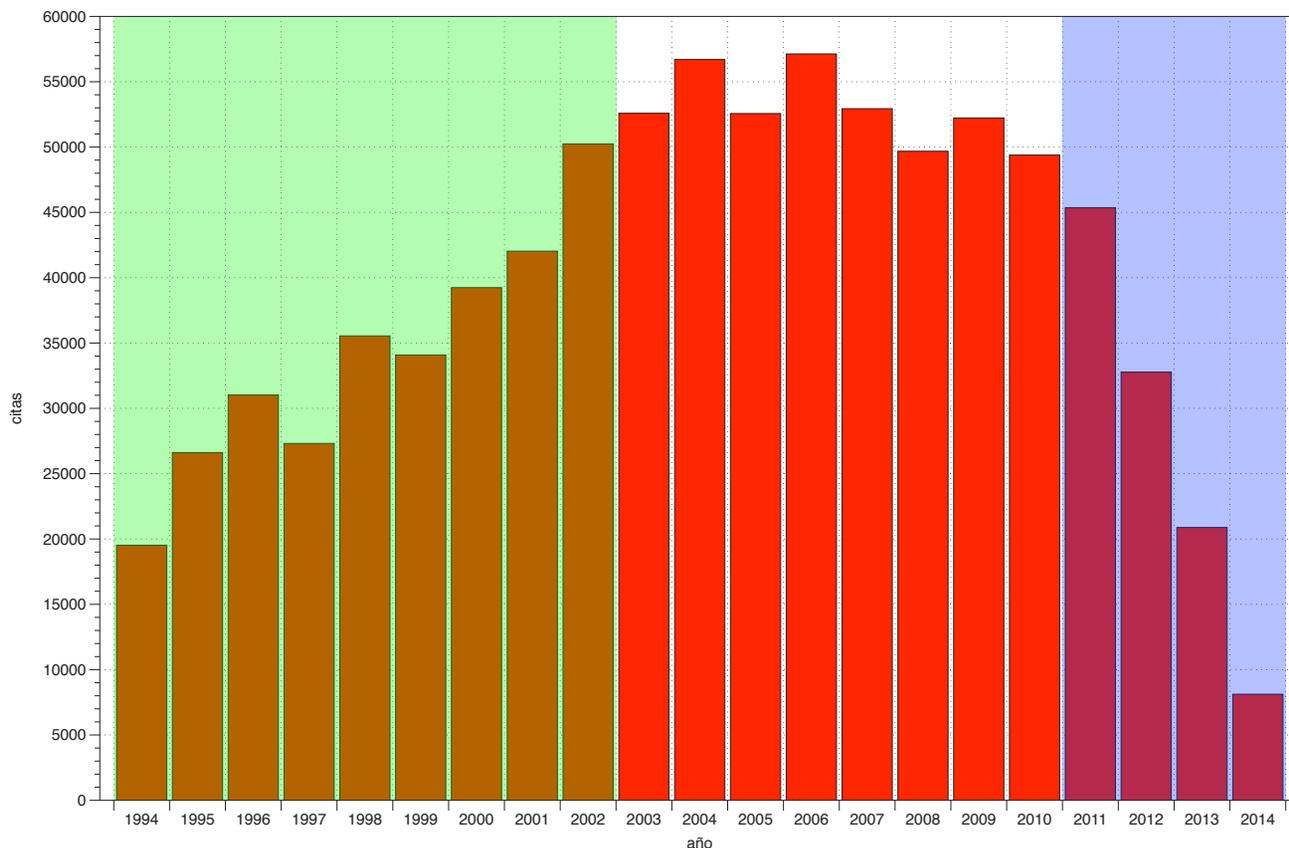
Figura 3
Distribución de la producción disciplinar en Chile. 25 disciplinas con mayor número de publicaciones en Chile, período 2004-2014



Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

Al igual que en el caso del número de publicaciones por disciplina, el impacto de las disciplinas desarrolladas en Chile también se reparte de forma desigual. Esta característica, que no es particular a la ciencia chilena, fue descrita ya en 1965 por Derek de Solla Price (Price, 1965). La Figura 5 muestra que el 72%³ de las disciplinas tiene como máximo 9 citas promedio por artículo en el período 2004-2014. Sólo un pequeño grupo de disciplinas tiene un impacto promedio mayor (más de 10 citas promedio).

Figura 4
Número de citas a abril de 2015, de los artículos científicos nacionales publicados en cada año. Período 1994-2014

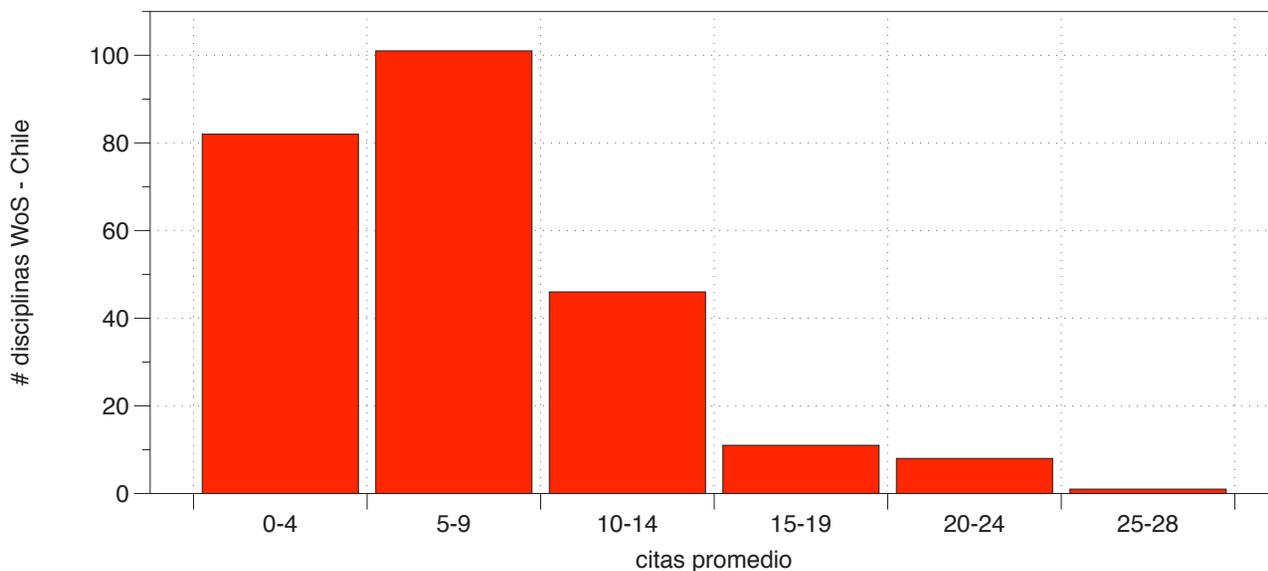


Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

2. Dependencia histórica y geográfica del conocimiento en Chile

La creación y evolución del conocimiento científico, como respuesta a determinados factores, se estudia en la mayoría de las investigaciones mediante el análisis de la dinámica que tienen ciertos temas (científicos) específicos, o la dinámica de algunas disciplinas en particular. Los trabajos de Bettencourt *et al.* (2009 y 2011) y Gaston y Boschma (2013) son en esta línea y apuntan a que el conocimiento científico existente, provee bloques sobre los que se construye conocimiento posterior.

Figura 5
Número de disciplinas WoS según el número de citas promedio por artículo. Período 2004-2014



Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

Debido a esto, el conocimiento depende de la historia y la geografía, es decir, depende de su contexto y sería la razón por la cual se concentra en ciertos lugares (Gaston & Boschma, 2013). La misma investigación destaca que el conocimiento se acumula a nivel regional porque los mecanismos a través de los cuales el conocimiento se difunde entre las organizaciones son espacialmente acotados. Incluso, cuando existe movilidad de los investigadores a nivel internacional, se tiende a reproducir y reforzar la concentración espacial de la actividad científica, ya que esta no sólo retiene sino que atrae científicos líderes. La bien conocida ventaja acumulativa de la que se hablaba más arriba.

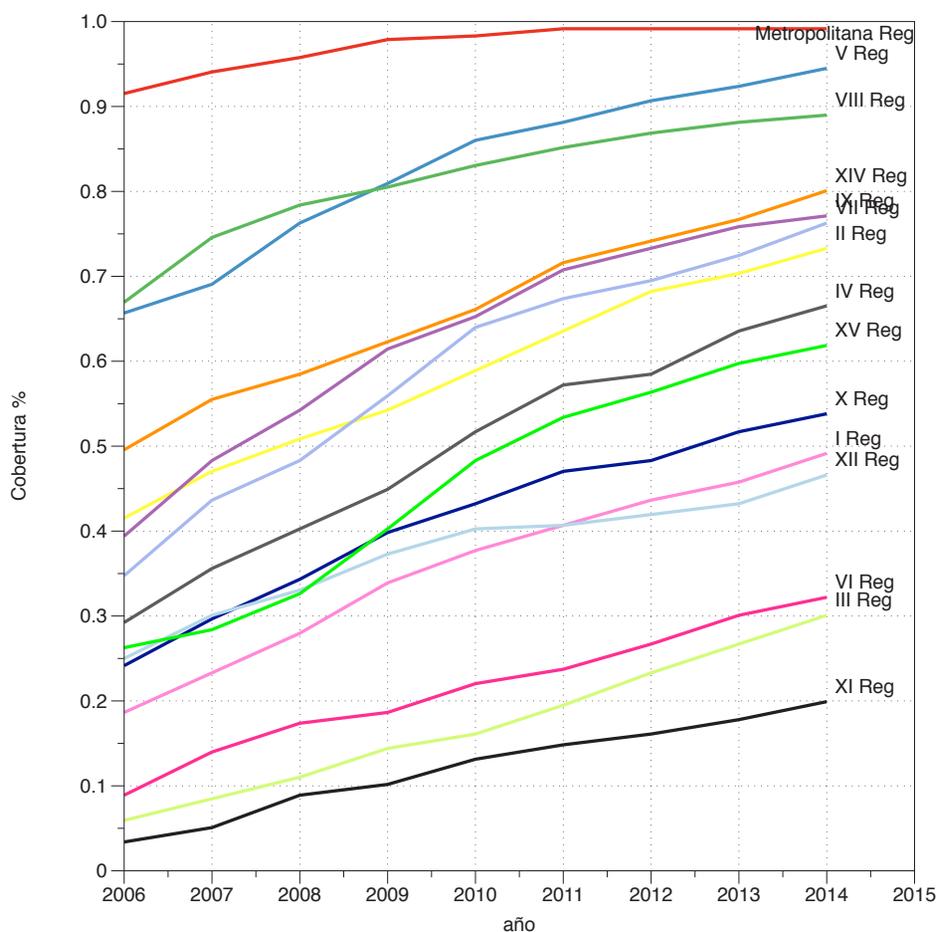
La concentración geográfica del conocimiento es posible observarla también en Chile. La Figura 6, por ejemplo, muestra la cobertura del universo de disciplinas WoS para cada una de las regiones del país.

Se aprecia que la región Metropolitana (curva roja superior) cubre casi el 100% del total de disciplinas WoS, prácticamente desde el año 2009. Una clara concentración de los distintos conocimientos en esta parte del país. El resto de regiones presenta una cobertura bastante heterogénea el año 2014 denotando concentración de conocimientos sólo en alguna de ellas, como por ejemplo, la región de Valparaíso y la del Biobío.

Un aspecto llamativo es que la tasa de cobertura para las regiones de Chile, a excepción de la región Metropolitana, es muy similar. De hecho, si se colapsan las curvas de cobertura para todas las regiones, se obtiene una tasa de crecimiento promedio cercana al 3% anual. Por otro lado, el hecho de que la tasa de crecimiento de la cobertura sea siempre positiva es otra cosa interesante.

Este fenómeno puede ser explicado por teorías referidas a los sistemas complejos adaptativos y en particular por las ideas de Stuart Kauffman, quien acuñó en 1995 (Kauffman, 1995) el concepto de “adyacente posible”. Según este investigador, los sistemas complejos de este tipo —dentro de los cuales no sólo están los biológicos, sino que también los económicos, los sistemas de innovación y los científicos— buscan espontáneamente el adyacente posible: ese conjunto de alternativas que están sólo a un paso de hacerse realidad en función de las ya existentes. Para Kauffman esto puede ser entendido como un juego de Lego, donde el adyacente posible lo representan todas las configuraciones posibles de armar (vincular) a partir de las formas ya ensambladas. El conocimiento explora y rompe límites constantemente (Gaston & Boschma, 2013) de la misma forma, armando relaciones nuevas a partir de las ya existentes. Sería ese mismo fenómeno el que se observa en las regiones de Chile, en mayor o menor medida, de ahí su tasa de crecimiento positiva. Es precisamente esa idea de “armar vínculos” la que se desarrolla en las siguientes secciones para construir la cartografía de conocimiento.

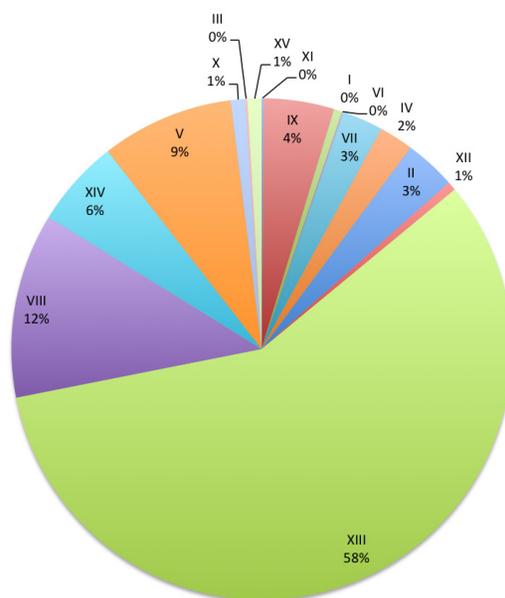
Figura 6
Desarrollo (acumulado) de disciplinas WoS para la producción científica de las regiones de Chile
período 2006-2014



Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

El mecanismo de ventaja acumulativa sumado a la naturaleza tácita del conocimiento (Gertler, 2003), hace que este sea específico a las personas, razón por la cual su concentración se manifiesta también en sus agentes generadores, los investigadores⁴. Lo anterior puede observarse para el caso chileno en la Figura 7a que muestra la concentración de autores a nivel regional pero también a nivel disciplinar en Chile (Figura 7b) para dos regiones, una con alta cobertura (región de Valparaíso) y otra de baja cobertura (región de Atacama).

Figura 7a
Distribución del número de autores afiliados a una institución de una región chilena en el período 2008-2014



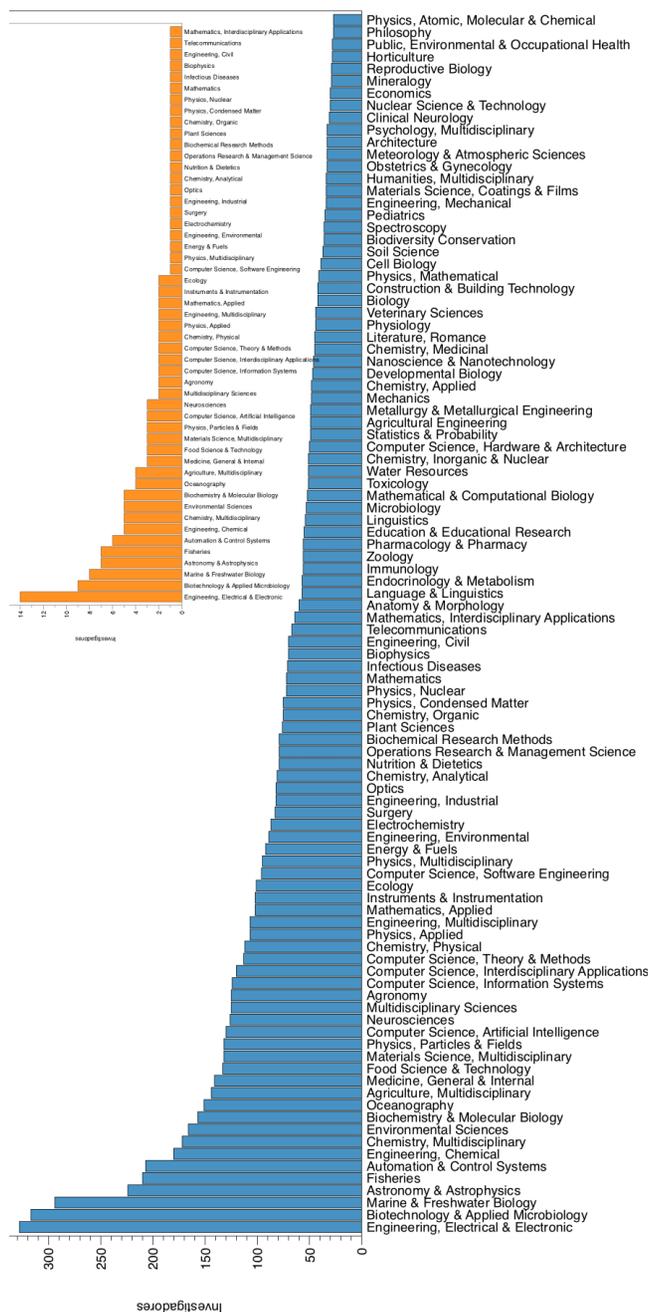
Nota: La razón para escoger este período, es que la base de datos sólo a partir del año 2008 es clara respecto a las afiliaciones de los autores.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

4 En este caso investigadores es sinónimo de autores de artículos científicos.

Serie Estudios

Figura 7b
Cantidad de investigadores (autores en las regiones de Valparaíso y de Atacama



Nota: Las barras azules corresponden a Valparaíso (sólo las 100 disciplinas más importantes). Las barras naranjas a la región de Atacama. El número de autores es aproximado debido a las distintas firmas de estos en artículos científicos

Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

La dinámica tras la concentración de autores en las regiones de Chile se muestra en el Cuadro 3, ilustrando un fenómeno bastante estudiado (Broekel *et al.*, 2014) que sugiere que ciertas regiones van aumentando su capacidad de atracción, según aumenta el número de investigadores. Esto se ve en el cuadro para las regiones más importantes en producción científica, que concentran sobre el 90% de las publicaciones nacionales, donde las tasas de crecimiento promedio de autores son positivas y relativamente altas.

Cuadro 3
Número de autores y su tasa de crecimiento por región

REGIÓN	NÚMERO DE AUTORES POR REGIÓN*							CRECIMIENTO PROMEDIO NÚMERO DE AUTORES
	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2008-2013
NACIONAL	16.930	18.749	19.362	20.938	23.354	24.646	20.937	7,80%
METROPOLITANA	10.500	11.082	11.671	12.563	13.664	14.535	12.002	6,70%
BIOBÍO	2.225	2.377	2.436	2.621	2.993	3.010	2.607	6,20%
VALPARAÍSO	1.323	1.767	1.652	1.669	2.270	2.303	2.030	11,70%
LOS RÍOS	895	1.219	1.070	1.283	1.274	1.544	1.154	11,50%
ARAUCANÍA	455	592	788	836	948	1.140	1.087	20,20%

Se muestran las regiones que concentran la producción científica nacional.

** El número de autores/región fue obtenido mediante un procedimiento que acumula nombres distintos de personas que aparecen en los artículos afiliados a cada región del país. El número de nombres distintos cada año corresponde al número de autores por región acumulado.*

Nota: el año 2014 tiene una cantidad menor de autores porque la base de datos tiene un retraso para completar todas las publicaciones de ese año.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

Al preguntarse si la red nacional de científicos colabora con investigadores en el extranjero, el Cuadro 4 muestra la proporción de autores extranjeros en artículos de cada región, además de la proporción de autores asociados a otras regiones. Se evidencia la alta participación extranjera entre las regiones de Atacama y en la de Coquimbo por el desarrollo particular de la astronomía.

Por su parte, la región Metropolitana concentra la mayor cantidad de autores nacionales, la menor colaboración con otras regiones y, además, un alto porcentaje de extranjeros, lo que sugiere una importante conexión con la ciencia global. Similar situación pero en menor medida puede verse en la región de Valparaíso.

Cuadro 4
Proporción de autores de la región, de otras y extranjeros en artículos con afiliación a regiones de Chile

REGIÓN	REGIÓN	OTRAS REGIONES	EXTRANJEROS
I	42%	32%	26%
II	48%	20%	31%
III	35%	30%	35%
IV	35%	20%	45%
IX	57%	20%	23%
V	56%	17%	27%
VI	32%	45%	23%
VII	56%	21%	23%
VIII	57%	15%	29%
X	47%	30%	23%
XI	28%	56%	16%
XII	42%	25%	33%
XIII	64%	6%	30%
XIV	52%	20%	28%
XV	46%	24%	30%

Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

Finalmente, un resultado de esta investigación apunta a que el conocimiento científico realizado en Chile muestra coincidencia con los principales sectores productivos de cada región.

En la columna izquierda del Cuadro 5 se aprecia que el mayor número de autores en cada una de las regiones chilenas desarrolla, por lo general, investigación en temas vinculados con su producción económica: la de Atacama en ingeniería metalúrgica y minería, la del Maule en ciencia de plantas, al igual que la de O'Higgins con horticultura, la de Los Lagos en biología marina, entre otros ejemplos. Algo similar sucede con la principal disciplina en cada región según número de artículos (columna derecha). Aunque en este caso, "astronomía y astrofísica" parece desplazar el protagonismo de otras mostrando una presencia importante en distintas regiones.

Un mayor detalle de las principales disciplinas por número de autores y publicaciones por región se muestra en el Anexo 1.

Cuadro 5
Principales disciplinas por región según número acumulado de autores y artículos. Período 2008-2014

REGIÓN	# AUTORES	# ARTÍCULOS
	PRINCIPAL DISCIPLINA	PRINCIPAL DISCIPLINA
TARAPACÁ	Biología Marina (54)	Biología Marina (58)
ANTOFAGASTA	Biología Marina (307)	Astronomía y Astrofísica (208)
ATACAMA	Ingeniería Metalúrgica y Metalurgia (14)	Ingeniería Metalúrgica y Metalurgia (24)
COQUIMBO	Astronomía y Astrofísica (494)	Astronomía y Astrofísica (709)
VALPARAÍSO	Ingeniería Eléctrica y Electrónica (328)	Astronomía y Astrofísica (602)
O'HIGGINS	Horticultura (15)	Agricultura Multidisciplinar (17)
MAULE	Botánica (159)	Botánica (157)
BIOBÍO	Biología Marina (448)	Biología Marina (610)
ARAUCANÍA	Anatomía & Morfología (326)	Anatomía y Morfología (535)
LOS LAGOS	Biología Marina (141)	Biología Marina (295)
AYSÉN	Oceanografía (26)	Oceanografía (57)
MAGALLANES	Ecología (78)	Ecología (117)
METROPOLITANA	Medicine, General e Interna (3152)	Astronomía y Astrofísica (3948)
LOS RÍOS	Ciencias Veterinarias (386)	Ciencias Veterinarias (373)
ARICA Y PARIN.	Antropología (67)	Antropología (122)

**El número de autores se cuenta por cada disciplina de manera independiente, por tanto la suma no necesariamente es reflejo de los autores de la región.*

Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

A pesar de lo interesante de este resultado, es necesario decir que, si bien no es posible afirmar en esta investigación que las publicaciones aquí consideradas tengan un vínculo real y concreto con el sector productivo, sí es un indicativo de las capacidades de investigación ya instaladas en regiones en torno a esas disciplinas. Esto podría servir a futuras articulaciones de políticas públicas.

III. CARTOGRAFÍA DEL CONOCIMIENTO EN CHILE (CCC)

Los niveles de producción científico-disciplinar chilena, así como su dependencia histórica y geográfica, son sólo una parte del panorama científico nacional. Su correcta interpretación requiere de un “tablero” donde estos datos pasan a ser las “fichas”.

Por el carácter de sistema que tiene el conocimiento científico, serán precisamente los vínculos disciplinares de ese tablero o mapa sobre el cual los datos de producción, impacto y dependencia histórica y/o geográfica cobran real relevancia ya que este mapa impone las reglas de juego. La obtención de ese mapa o cartografía, así como su análisis, es precisamente uno de los objetivos de esta investigación.

La cartografía del conocimiento chileno (CCC) consiste en una red de disciplinas. Su estructura de relaciones así como su representación espacial debe contener información sobre otra de las hipótesis fundamentales de esta investigación: que la colaboración disciplinar responde a necesidades de complemento para la generación de conocimiento. Es de esta forma que el conocimiento explora y rompe límites.

Esa red reflejaría el complemento disciplinar necesario para la evolución del conocimiento científico y la generación de conocimiento complejo. El carácter rupturista y exploratorio del conocimiento (Gaston & Boschma, 2013) requiere de un todo integrado, de vínculos, de reglas, no de entidades (disciplinas) aisladas. Sólo así la evolución de este sistema puede ser abordada.

La red que se busca estaría estructurada de forma tal que aquellos nodos (disciplinas) vecinos, o próximos, evidenciarían conocimientos complementarios para la construcción de conocimiento. De esta forma, una vez establecida la proximidad entre disciplinas (determinada por los enlaces entre estas en ese espacio relacional) la CCC se transforma en una poderosa herramienta para detectar su estado actual, en cuanto a estructura-red en el tiempo y regiones, permitiendo así también poder evaluar su desarrollo potencial.

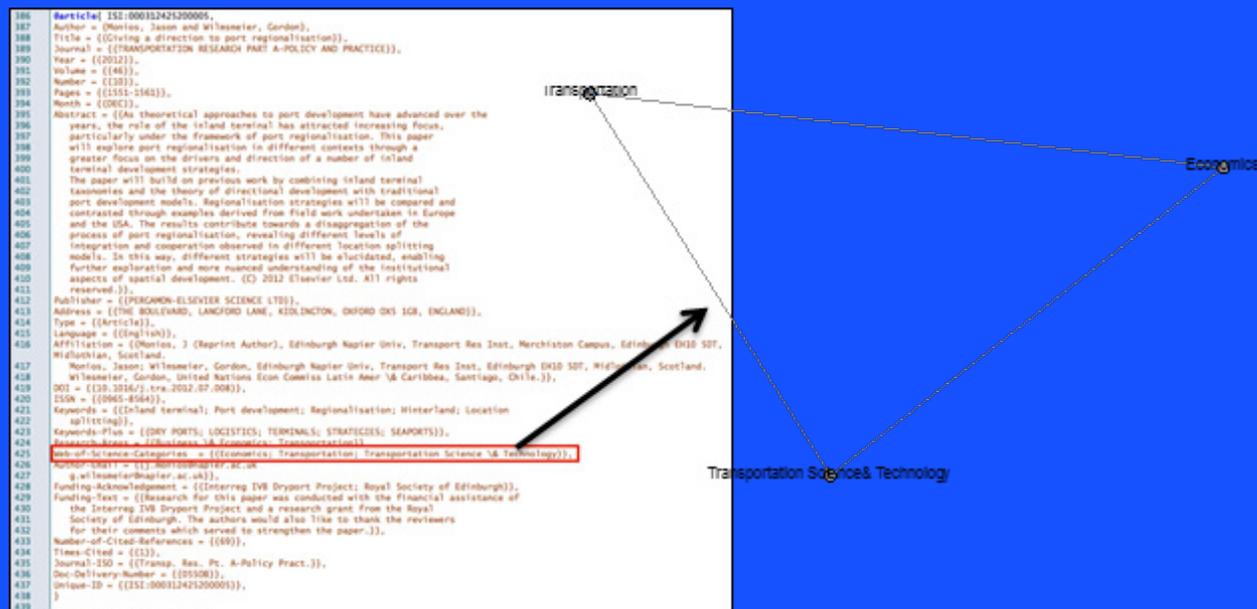
1. Construcción de la cartografía

Para construir la CCC se empleó, como primer paso, la metodología descrita en el cuadro de la página 21, siendo la medida para determinar la proximidad entre disciplinas, el valor de frecuencia de relación c . La Figura 8 muestra la red de disciplinas para todas las publicaciones nacionales que generaron vínculo disciplinar en el período 2004-2014. El grosor de cada enlace grafica el valor de frecuencia c .

Dada la complejidad visual de la red generada, se aplicó a continuación el algoritmo *Maximum Spanning Tree (MST)* para “limpiar” y simplificar la imagen. Uno de los usos del MST es detectar, por ejemplo, aquel conjunto de enlaces de una red que signifiquen un menor costo de comunicación entre dos nodos de un sistema de telecomunicación. Por eso, desde este punto de vista, la red obtenida grafica eso: la red de disciplinas desarrolladas en Chile unidas por un conjunto de enlaces cuyo costo de conexión (total) es el menor.

Construcción de la cartografía de conocimiento (Paso 1)

Se definió una red o grafo de disciplinas como $G(D,E)$. Este grafo está compuesto por el conjunto de disciplinas distintas D y el conjunto E de sus relaciones* de co-ocurrencia en artículos científicos en un período determinado. Como cada artículo científico tiene asociada una o más disciplinas científicas de acuerdo a WoS según la revista donde se publicó, serán precisamente estas “WoS-disciplinas” (WoS-Categories) las que conformarán los nodos de G . Un ejemplo de la construcción de G se muestra en la siguiente figura.

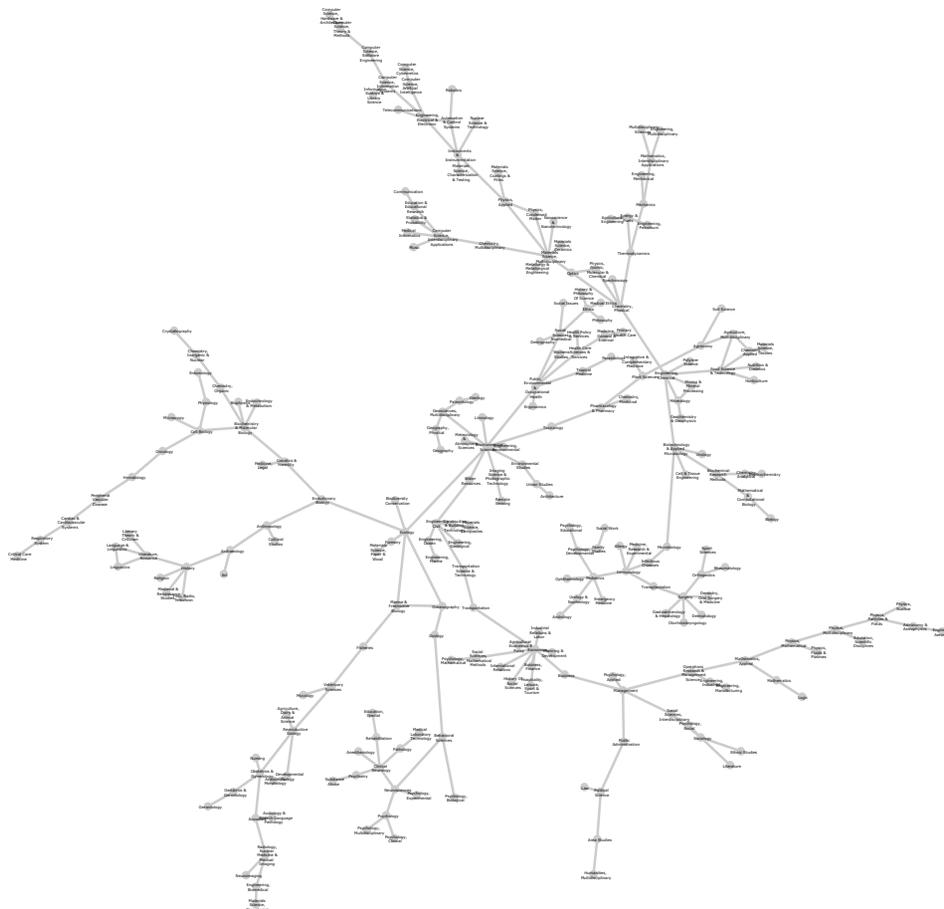


En rojo se muestra el campo que contiene las disciplinas (categorías) científicas para este artículo separadas por “;”, de acuerdo con la revista donde se publicó. El grafo G contiene todas las disciplinas del artículo vinculadas entre sí.

Ya que dos disciplinas pueden aparecer más de una vez juntas al analizar varios artículos, se definió c como la frecuencia de relación entre dos disciplinas en un período determinado. En el caso del ejemplo, ya que sólo hay un artículo, $c=1$ para cada uno de los 3 enlaces.

* Si bien existen diversos métodos para definir los vínculos en mapas de conocimiento disciplinar, ya sea usando términos, revistas o citas (Klavans & Boyack, 2009), en esta investigación se optó por el método antes descrito debido a que permite vincular las disciplinas respecto del territorio, algo difícil de lograr en el caso chileno si se consideraran sólo las citas. De hecho, sólo un 4,8% de las citas totales de la última década son entre artículos nacionales y, de esas, sólo cerca de la mitad corresponde a co-citas, criterio empleado en algunos casos para determinar un vínculo como robusto. Por otro lado, debido a la estandarización de las categorías disciplinares de WoS, el método no tiene problemas con el procesamiento automático de grandes volúmenes de información, como sucede en el caso del uso de términos científicos que requieren de normalización.

**Figura 9. Cartografía del conocimiento chileno G'(236,241)
(Detalle en el Anexo 2)**



Nota: La visualización (proyección espacial) de la CCC fue lograda mediante el algoritmo Organic basado en el paradigma Force-direct Layout que se preocupa de posicionar las disciplinas en una superficie de dos dimensiones de forma que los enlaces sean más o menos de la misma longitud evitando cruces entre éstos, todo basado en fuerzas de repulsión entre los nodos de la red (Kobourov, 2012).

La CCC (Fig. 9) ilustra una red donde la proximidad espacial entre disciplinas de alguna forma refleja su cercanía, y por lo tanto su complementariedad, definida para determinar sus enlaces. Por esta razón, disciplinas ubicadas en el centro de la red, son disciplinas más cercanas y complementarias al resto, no así las que figuran en la periferia. Es importante mencionar que existen muchas otras formas de visualizar redes de conocimiento científico (ver Börner *et al.*, 2003; Klavans & Boyack, 2009), cada una con una utilidad particular, desde el ordenamiento jerárquico al temático.

2. Análisis de la cartografía

Una primera mirada a la CCC obtenida muestra una estructura dominada por un grupo pequeño de nodos concentrando más vinculaciones que el resto. Disciplinas tales como “Ciencias del Medio Ambiente”, “Economía”, “Bioquímica y Biología Molecular”, “Ciencia de Materiales Multidisciplinar”, “Salud Pública Ambiental”, “Ecología”, “Ingeniería Química” y “Ciencias de la Computación Aplicaciones Interdisciplinarias” están por sobre el resto de disciplinas en conectividad.

Sin embargo, el número de vinculaciones pierde relevancia cuando el análisis se centra en otras propiedades, como por ejemplo la centralidad (*closeness centrality*⁶) de la disciplina. “Economía” (pero también, “Ciencia de Materiales Multidisciplinar”, “Bioquímica y Biología Molecular”, “Ciencias de la Computación Aplicaciones Interdisciplinarias” y “Neurociencias”) por ejemplo, si bien es una disciplina muy conectada, en la CCC está alejada del centro de la red. A pesar de ser un insumo para varias disciplinas en la generación de conocimiento, estas son una parte poco central de la red de conocimiento científico de Chile. Esto queda en evidencia en la Figura 10, donde el centro de la red agrupa aquellas disciplinas más cercanas al resto (color rojizo). Este centro se denominó “núcleo del conocimiento chileno”, por agrupar aquellas disciplinas que funcionan como complementos cercanos de gran parte del resto, contribuyendo a la elaboración de conocimiento en Chile.

En este núcleo destaca “Ciencias del Medio Ambiente” por ser una de las que más disciplinas conecta siendo además el puente de unión de conocimientos entre distintas regiones de la red. Es la disciplina más cercana al resto que según la analogía de costos, reflejaría aquel conocimiento complementario que genera menos costos asociados en la elaboración de conocimientos con el resto de disciplinas.

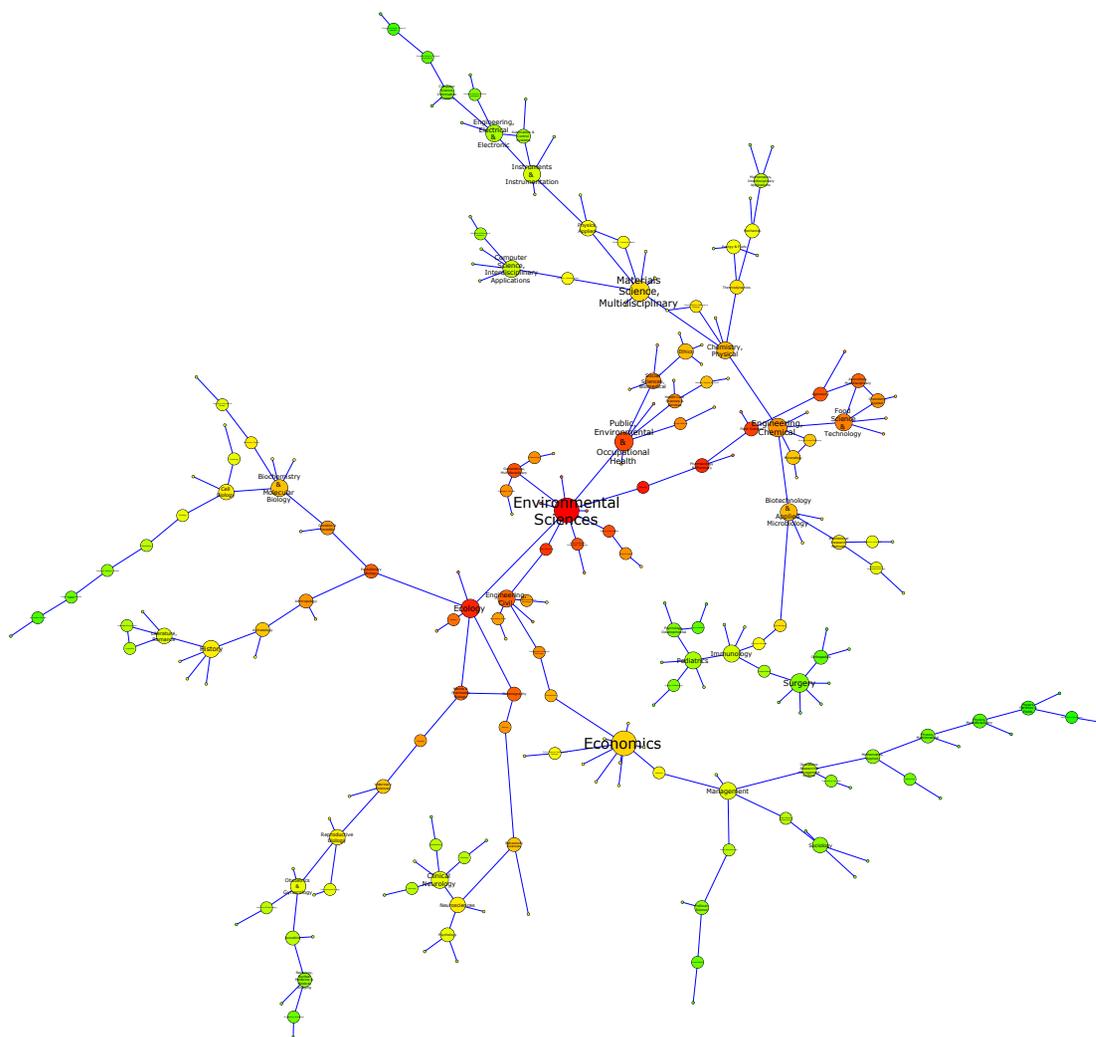
Ahora, ¿qué sucede si se utiliza esta CCC para interpretar los datos de la sub-sección I de esta investigación?

Por ejemplo, al superponer sobre la red la producción e impacto de las disciplinas (Figura 11), se aprecia muy claramente que “Astronomía & Astrofísica”, la disciplina chilena “súper productiva” y de alto impacto, está muy alejada del núcleo del conocimiento. Su aporte al resto del conocimiento nacional se ve dificultado, ya que se encuentra en una posición poco estratégica en esta red de complementos. Es necesario mencionar que si bien esta disciplina es un caso excepcional en producción y citas dentro del panorama científico chileno (ver Figura 3), dejarla fuera del análisis debido a su perfil *outlier*, no afecta en prácticamente nada la estructura y por lo tanto el análisis de la cartografía, ya que su posición es periférica y de menor aporte complementario disciplinar.

Los resultados muestran, además, que la gran mayoría de las disciplinas pertenecientes al núcleo del conocimiento, no son las más productivas y de alto impacto. Sólo “Ecología”, “Ciencias del Medio Ambiente”, “Medicina, General e Interna” y “Biología Marina” conjugarían ambas propiedades: el ser productiva y de impacto (alto número de citas) y, por otro lado, ser complementos intelectuales centrales para el desarrollo del conocimiento en Chile.

6 Caracteriza a los nodos por su distancia respecto al resto.

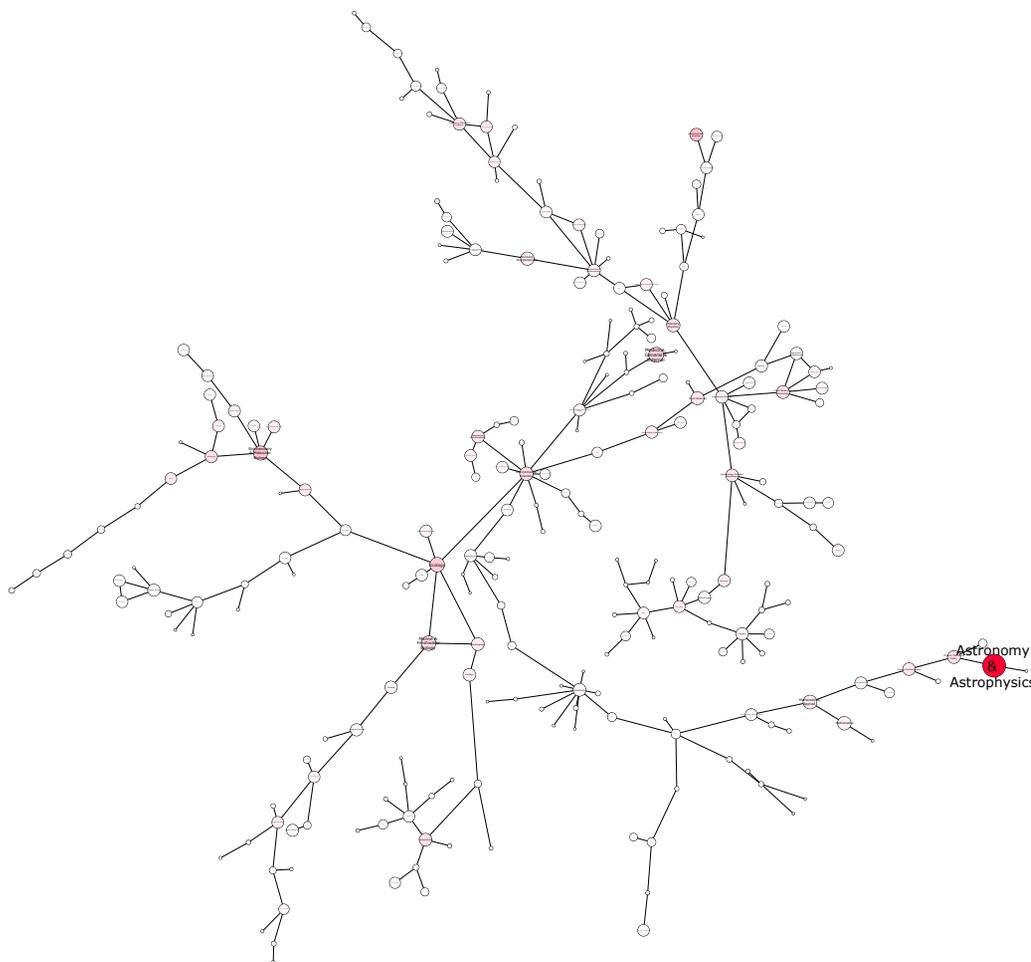
Figura 10
Centralidad y conectividad disciplinar en la cartografía del conocimiento chileno
Tamaño de los nodos según conectividad



Nota: Color representa centralidad (Closeness centrality) (escala verde->amarillo->rojo).

Por otro lado, al superponer sobre la cartografía el perfil de los investigadores (Fig. 12), el análisis sugiere que en la periferia de la CCC se desarrollan diversas disciplinas dependientes de participación de autores afiliados al extranjero, con lo cual pueden suceder dos cosas: que el conocimiento quede y fluya en el país, o que este permanezca en el extranjero sin alimentar al sistema nacional ya que son los investigadores, sus relaciones sociales y sus comportamientos, determinantes en su evolución (Lambiotte & Panzarasa, 2009).

Figura 11
Producción e impacto disciplinar en la cartografía del conocimiento chileno



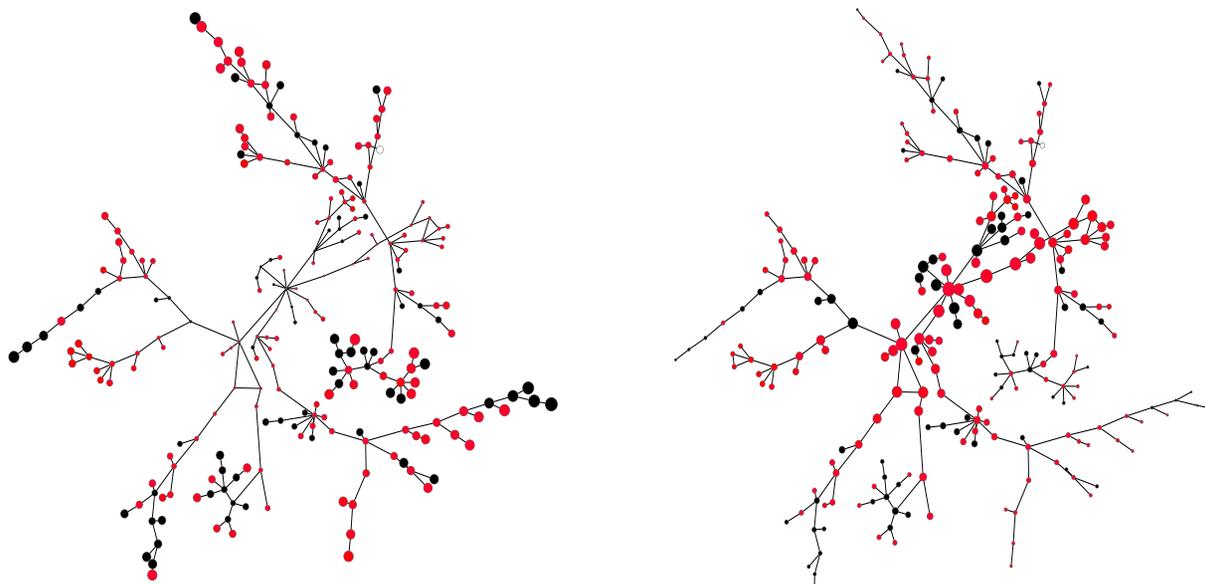
Nota: Tamaño de los nodos representa la producción (número de artículos en el período 2004-2014). Color de los nodos (Escala: blanco-> rojo) refleja número de citas (mismo período que la producción).

En la cartografía del lado izquierdo de la figura, se representa por tamaño de nodos aquellas disciplinas más alejadas del resto, las periféricas. En la de la derecha, lo contrario. Se puede apreciar que el núcleo del conocimiento chileno por lo general presenta artículos donde al menos el 50% de los autores están afiliados al país (nodos rojos, cartografía derecha)⁷. En la periferia sin embargo, son muchas las disciplinas que dependen fuertemente de mano de obra extranjera (nodos negros), incluidas "astronomía y astrofísica"⁸, otras disciplinas Físicas y muchas disciplinas de la medicina y la Neurociencia.

7 Para decir esto se analizó la proporción promedio de autores nacionales (afiliados a alguna institución chilena) respecto de aquellos afiliados al extranjero del total de publicaciones de cada disciplina.

8 Los artículos científicos en "astronomía y astrofísica" congregan muchos autores, en promedio 21,8 durante 2014, en comparación a los 4,3 como promedio de las disciplinas ese mismo año.

Figura 12
Proporción de autores "nacionales" por disciplina



Nota: Color de los nodos refleja proporción de autores nacionales respecto a extranjeros (Escala: negro-> rojo).

Izquierda: Nodos periféricos destacados por tamaño (< Closeness centrality).

Derecha: Núcleo del conocimiento chileno destacado por tamaño (> Closeness centrality).

Finalmente, la CCC muestra que el núcleo del conocimiento chileno está en disciplinas tales como las ciencias medio ambientales, ecología, biodiversidad y conservación, junto a ciencias del mar y de la tierra. Destacan también algunas disciplinas agrícolas y médicas, ciencias de la ingeniería, ciencias químicas, y otras vinculadas a la minería. Es clara la relación entre este núcleo y los principales sectores productivos del país, muchos de estos basados en la explotación de recursos naturales.

Como lo señala CEPAL (2010), concentrar las actividades manufactureras en sectores de este tipo se asocia a una limitada capacidad de demanda de investigación aplicada, tal como se expone en la siguiente sección.

Principales hallazgos de la sección A

1. La producción de artículos científicos en Chile ha tenido un fuerte crecimiento en las dos últimas décadas, lo cual se asocia a una heterogeneidad en la distribución de la producción e impacto entre disciplinas. Lo mismo ocurre entre regiones donde claramente la Metropolitana domina la investigación científica, seguida por Valparaíso y Biobío.
2. El supuesto bajo el cual se construye la cartografía del conocimiento en Chile es que la riqueza o sofisticación del espacio relacional del conocimiento se da por vínculos de complemento entre disciplinas. Bajo este supuesto, en el sistema de conocimiento en Chile existe un grupo pequeño de disciplinas más vinculadas y cercanas al resto. Este grupo se denominó “núcleo del conocimiento chileno.”
3. El núcleo del conocimiento chileno está relacionado con disciplinas asociadas a los recursos naturales.
4. El conocimiento científico realizado en Chile muestra coincidencia con los principales sectores productivos desarrollados en cada región, lo que representa una indicación de las capacidades de investigación ya instaladas en regiones, pudiendo servir este conocimiento a futuras articulaciones de políticas públicas.

B. La cartografía como herramienta de comparación

En esta sección se compara la CCC con la de dos países⁹: Nueva Zelanda y Finlandia. La comparación se hace desde la perspectiva del complemento o colaboración disciplinar en las ciencias como una forma de describir y aproximarse al conocimiento científico de cada país bajo otra de las hipótesis planteadas en esta investigación: el sistema de conocimiento científico y el sector productivo de un país son proyecciones mutuas.

El interés tras la comparación radica en lo atractivo que parecen para Chile modelos económicos y productivos cuyo desarrollo tenga un eje importante en los recursos naturales. Finlandia y Nueva Zelanda tienen esa característica, pero además cada uno de estos presenta particularidades interesantes.

La comparación con Finlandia se sustenta en contrastar la realidad científica chilena con la de un país de industrialización tardía, pero con importante desarrollo científico y tecnológico. Finlandia presenta, a nivel internacional, uno de los mejores indicadores relacionados con la innovación, lo que se ha traducido en las últimas décadas en un desarrollo acelerado en áreas de la tecnología de la información y las comunicaciones, así como en algunas ramas de la manufactura, muchas de estas pertenecientes a sectores productivos considerados como intensivos en tecnología (Dalhman *et al.*, 2006). Este es un país pequeño pero con una estrategia de posicionamiento internacional exitosa, basada en la acumulación de conocimiento científico y tecnológico a nivel nacional. Por otra parte, el desarrollo productivo de Finlandia se basó históricamente en los recursos naturales, lo que lo asimila a Chile en el desarrollo inicial del conocimiento.

La elección de Nueva Zelanda se debe a lo atractivo que resulta compararse con un país con crecimiento basado también en los recursos naturales, pero de menor diversificación productiva que Finlandia. Aún cuando está considerado entre los países desarrollados, la revisión de políticas de innovación de la OECD (2007) destaca algunas debilidades como sus bajos niveles de crecimiento y productividad de acuerdo a los estándares de la OECD.

De acuerdo a esto, la cartografía de conocimiento Nueva Zelanda (CCNZ) sería parecida a la de Chile, por la similitud de sus estructuras productivas y canasta exportadora, si es que efectivamente la evolución del conocimiento y su grado de sofisticación responde a las demandas de la actividad económica y del desarrollo productivo. A su vez, la cartografía del conocimiento de Finlandia (CCF) debiera presentar diferencias con ambos países.

Esta relación es intuitiva pero pertinente, ya que el conocimiento es un factor indispensable en la creación de valor agregado de los productos y servicios de un país. Según CEPAL (2010), la mayoría de los países de Iberoamérica, dentro de los cuales está Chile, tienen una estructura productiva altamente concentrada en algunos sectores específicos, clasificados como poco intensivos en tecnología o conocimiento¹⁰. Las políticas de ciencia y tecnología en este tipo de países no han llegado a crear un ambiente adecuado para estimular la confluencia entre la oferta de conocimiento científico-tecnológico, generado (principalmente) por las universidades, y la demanda del sector

9 Para la construcción de estas cartografías, se utilizó el mismo período, 2004-2014, y el mismo criterio de considerar como producción científica nacional todos los artículos que tuviesen al menos un investigador afiliado a alguna institución de Nueva Zelanda o Finlandia, según fuera el caso.

10 Los sectores considerados como intensivos en tecnología son: productos fabricados de metal, maquinaria, maquinaria eléctrica, equipo de transporte, equipo técnico y profesional (CEPAL, 2010).

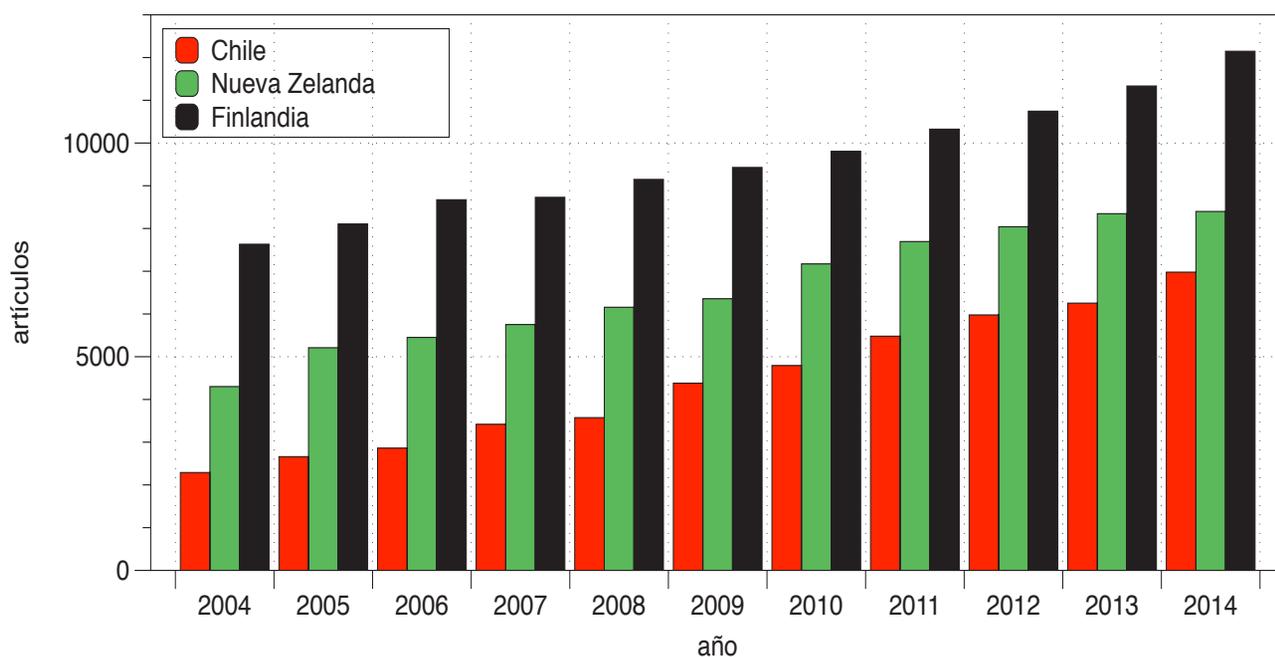
productivo (véase al respecto OECD 2012, Lester 2005, Gu y Lundvall 2006, Giuliani y Arza 2008, entre otros). Esta falta de coordinación entre la generación y la aplicación del conocimiento en ciencia y tecnología, tendría incidencia en las características del sistema de conocimiento científico y, por lo tanto, en su cartografía. Aunque esta relación no se aborda en este estudio, sí se elabora un indicador de sofisticación o complejidad del sistema de conocimiento que permite establecer relaciones con la política de Investigación y Desarrollo, así como con la estructura productiva de los países.

I. PRODUCCIÓN CIENTÍFICA COMPARADA EN TRES PAÍSES: CHILE, FINLANDIA Y NUEVA ZELANDA

Al igual que en la primera sección de este documento, parece pertinente aproximarse a las cartografías de los países estudiando primero su producción científica.

La Figura 13 muestra la producción de artículos científicos durante la última década para los tres países estudiados. Claramente, el más productivo es Finlandia, seguido por Nueva Zelanda y finalmente Chile. Este último es el que presenta un crecimiento más acelerado.

Figura 13
Artículos publicados en cada año en el período 2004-2014 en Chile, Nueva Zelanda y Finlandia



Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

Los datos anteriores no dejan de ser llamativos cuando se considera el tamaño poblacional de cada país, así como la proporción de esa población que representan los investigadores (Cuadro N°6).

Cuadro 6. Población, PIB pc (PPP) e Investigadores en I+D por millón de habitantes para Chile, Nueva Zelanda y Finlandia.

	CHILE	NUEVA ZELANDA	FINLANDIA
POBLACIÓN 2014*	17.308.449	4.384.000	5.388.272
PIB PC (PPP)	23.200	35.000	40.500
INVESTIGADORES EN I+D ** (INVESTIGADORES / MM HABITANTES)	317 (2010)	3.693 (2011)	7.423 (2011)

Fuente: * CIA Facts, ** Banco Mundial.

A pesar de que Finlandia y Nueva Zelanda cuentan con menos de un tercio de la población chilena, el número de investigadores por habitante en el primer caso es 23 veces mayor que Chile y 11 veces mayor en el caso de Nueva Zelanda.

Si bien las causas detrás de las marcadas diferencias en la producción científica entre los países no son materia de esta investigación, se sabe que uno de los factores influyentes es el gasto de los países en Investigación y Desarrollo (I+D) en relación con el PIB, tal como se observa en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Gasto en Investigación y Desarrollo como porcentaje del PIB.

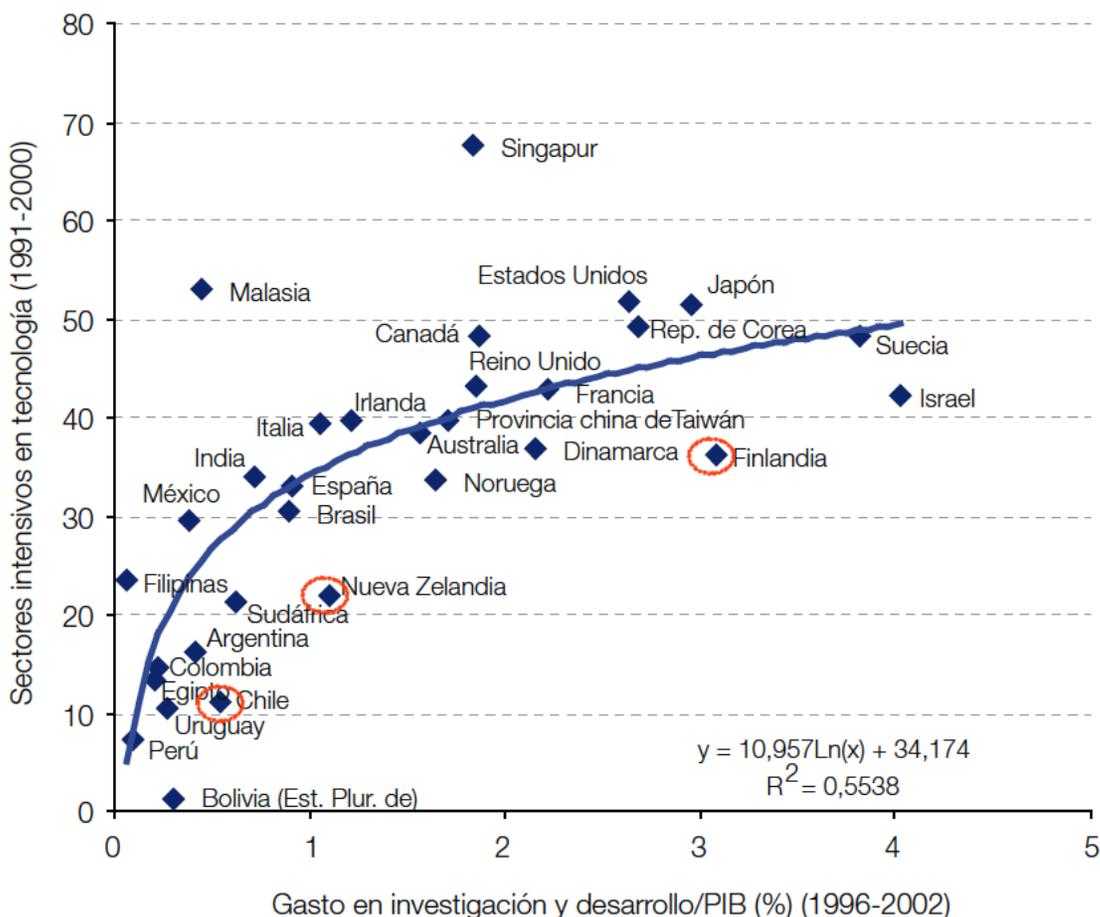
PAÍS	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
CHILE	s/i	s/i	0.31	0.37	0.41	0.42	s/i
NUEVA ZELANDA	1.13	s/i	1.17	s/i	1.28	s/i	1.27
FINLANDIA	3.48	3.48	3.47	3.70	3.94	3.90	3.80

Fuente: Banco Mundial.

Este es claramente superior en Finlandia, lo que es consecuente con el conjunto de políticas implementadas que lo sitúan como uno de los líderes mundiales en innovación. De hecho fue el país pionero en introducir el concepto de Sistema Nacional de Innovación como marco de referencia para la formulación de sus políticas públicas (Dahlman *et al.*, 2006). Si bien Nueva Zelanda tiene un gasto superior al chileno, esta cifra se encuentra cercana a la mitad del promedio de los países de la OECD.

Apoyando la hipótesis planteada en la introducción de esta sección, la Figura 14 muestra una correlación positiva entre el gasto en I+D y el desarrollo de sectores intensivos en tecnología (CEPAL, 2010), claves para el aumento en la demanda por conocimiento en los países que, como se verá más adelante, modifica las cartografías de conocimiento Científico de estos.

Figura 14
Especialización productiva y gasto en I+D

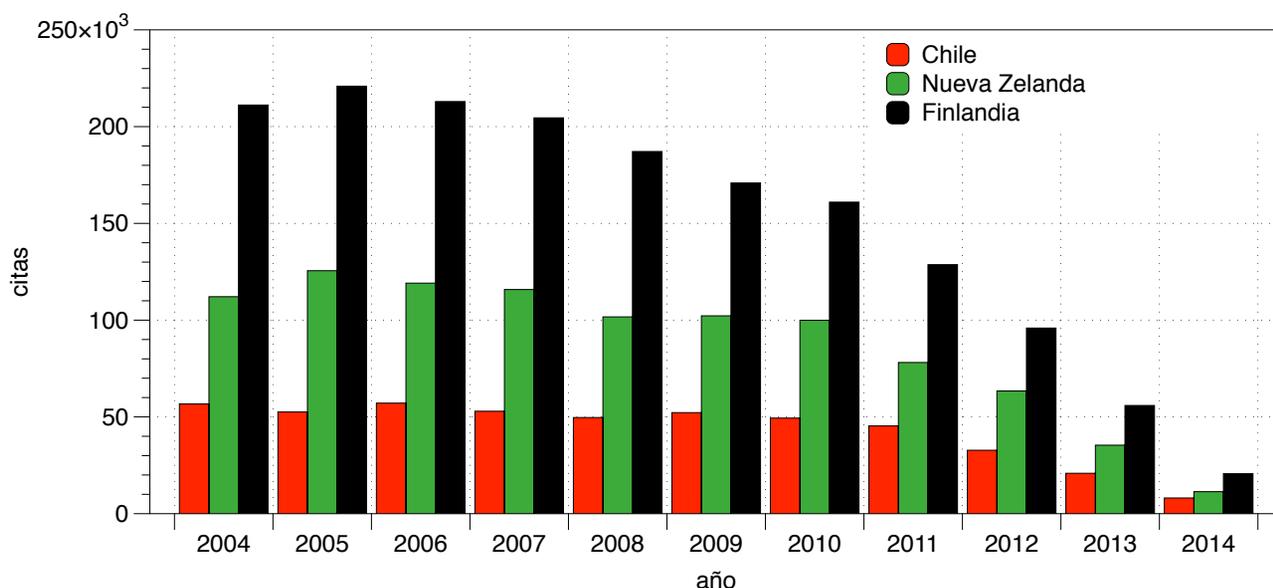


Nota: Los sectores considerados como intensivos en tecnología son los siguientes: productos fabricados de metal, maquinaria, maquinaria eléctrica, equipo de transporte, equipo técnico y profesional.

Fuente: CEPAL, sobre la base de CEPAL-DDPE (2007), Progreso técnico y cambio estructural en América Latina, Santiago de Chile, Naciones Unidas LC/W136. En: (CEPAL, 2010).

Otra gran diferencia entre Finlandia y Chile es que la mayor parte de la ejecución de la investigación (70%) del país europeo es generado por las empresas (CEPAL, 2010), mientras que en el caso de Chile es por las universidades (Fuente: Programa de Información Científica CONICYT).

Figura 15
Citaciones acumuladas hasta abril de 2015 para artículos nacionales (chilenos, neozelandeses y finlandeses) publicados en cada año del período 2004-2014



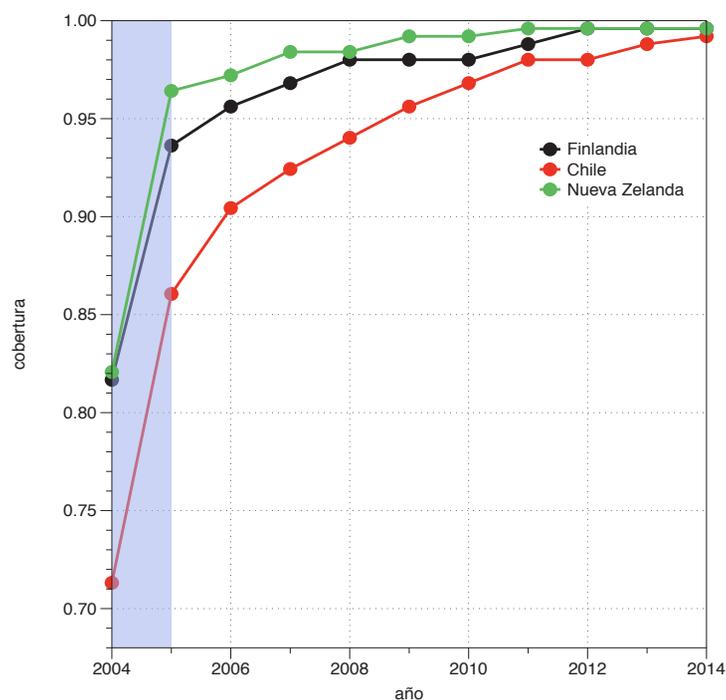
Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

A pesar de las diferencias en los niveles de impacto de las publicaciones en los tres países (Fig. 15)¹¹, observamos que en todos ellos, hacia fines del período estudiado, la cobertura de las disciplinas WoS es cercana al 100% (Fig. 16). Es decir, las diferencias de sus sistemas de conocimiento científico no pasan porque los países más desarrollados investiguen en disciplinas ausentes en Chile, sino que en la “intensidad” de su investigación así como en otros aspectos que se desarrollan a continuación.

La Figura 17 muestra que la concentración de producción disciplinar en Chile, evidenciada en la primera sección de este informe, es distinta a la de los otros dos países. En Chile, 25 de las 30 disciplinas con mayor producción de artículos generan entre los 500 y 1.500 artículos (un caso especial es el de “astronomía y astrofísica” en el extremo derecho de la gráfica), sin embargo, en Nueva Zelanda, y sobre todo en Finlandia, las disciplinas se reparten en distintos niveles de producción, lo que habla de un sistema más heterogéneo que el chileno en este aspecto, con ausencia de una producción disciplinar típica que represente a todo el sistema.

¹¹ Las citas por artículo para las disciplinas más productivas en Chile promedian 9.6. Ese promedio asciende a 16.1 y 18.2 para Nueva Zelanda y Finlandia, respectivamente.

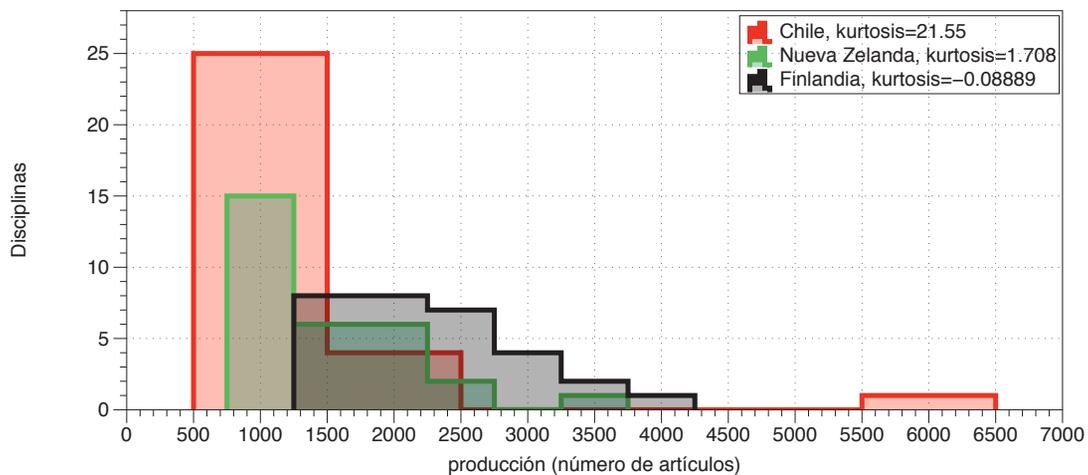
Figura 16
Cobertura disciplinar WoS para los tres países considerados



Nota: La zona marcada de azul responde a un período en el cual nuevas disciplinas se incorporaron a la base de datos, de ahí la caída en la densidad.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

Figura 17
Histograma y kurtosis asociada de la producción disciplinar para los tres países estudiados

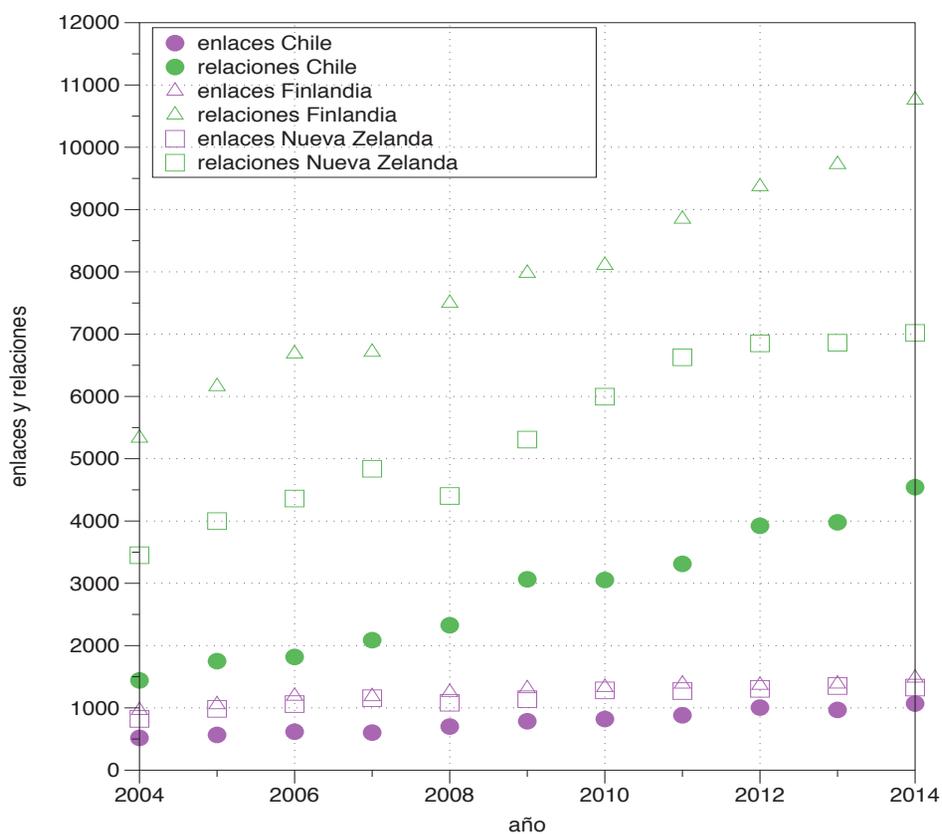


Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

II. CARTOGRAFÍA DEL CONOCIMIENTO, ESTUDIO COMPARADO

Un aspecto que permite comprender las diferencias entre las cartografías de los tres países tiene que ver con los niveles de producción disciplinar y cómo estos se plasman en las respectivas estructuras de red. De acuerdo con la Figura 18, el aumento de los enlaces distintos así como de las relaciones (frecuencia c) entre disciplinas, tiene una dinámica muy similar en los tres casos, con tasas de crecimiento anuales muy parecidas

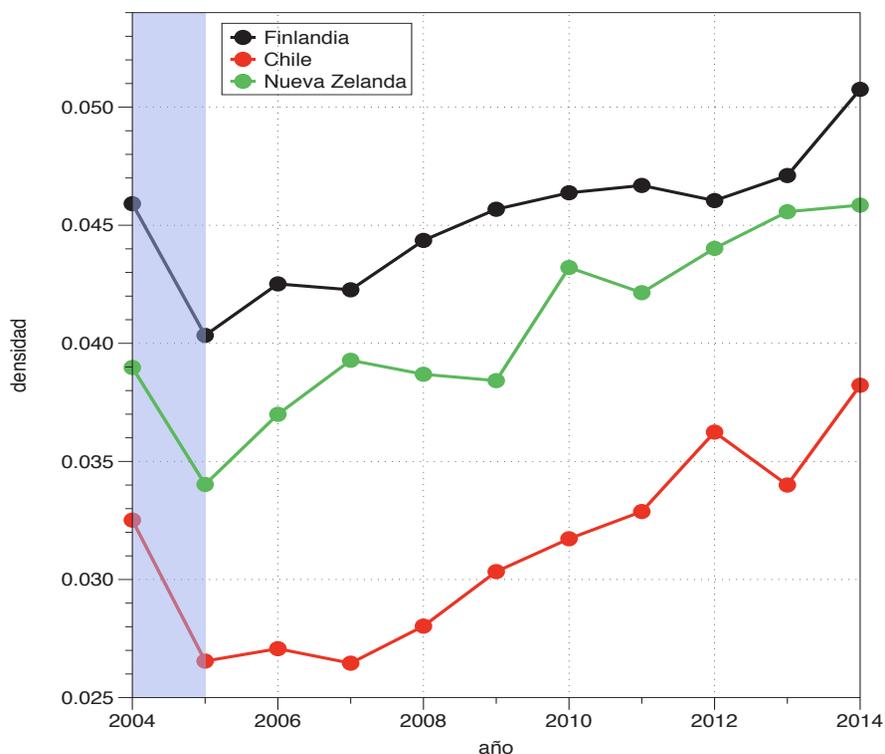
Figura 18.
Dinámica del número de enlaces y relaciones (frecuencia de enlace) para Chile, Nueva Zelanda y Finlandia para el período 2004-2014.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

Sin embargo, la magnitud de enlaces genera la primera gran diferencia entre las redes de los tres países ya que el número de vínculos es significativamente superior en el caso de Finlandia. Lo anterior queda en evidencia en la Figura 19, observándose que la densidad de enlaces entre disciplinas de la red de Finlandia es superior a la de Nueva Zelanda y muy superior a la chilena.

Figura 19
Densidad de enlaces en las redes de complemento disciplinar para Chile, Nueva Zelanda y Finlandia para el periodo 2004-2014

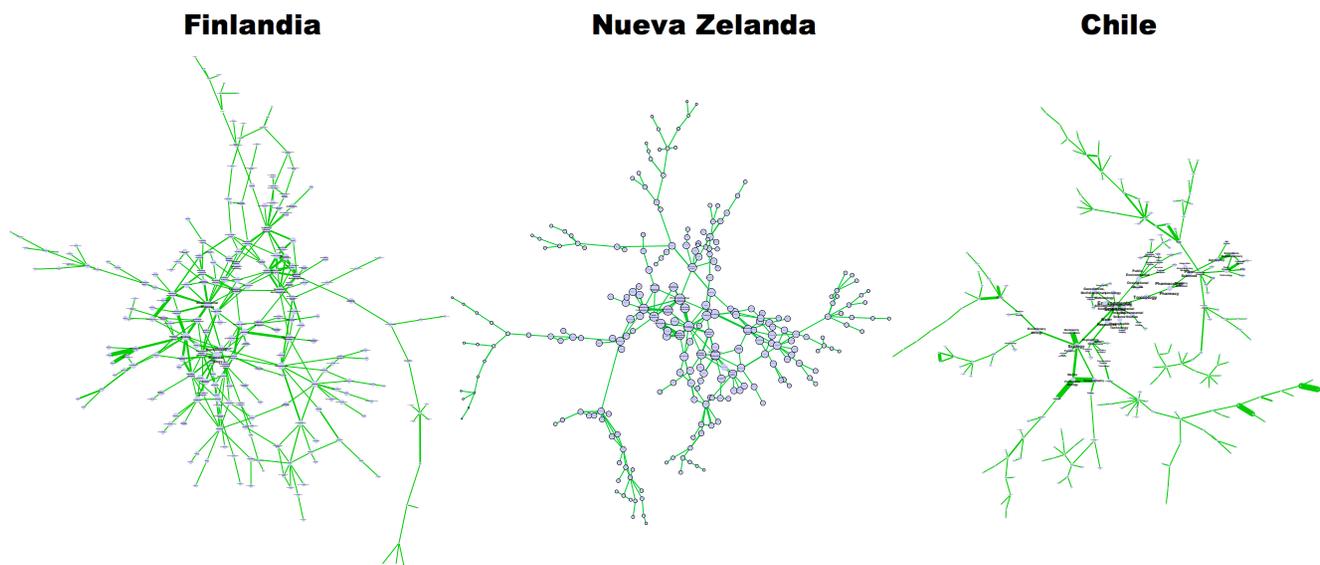


Nota: La zona marcada de azul responde a un período en el cual nuevas disciplinas se incorporaron a la base de datos, de ahí la caída en la densidad.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos WoS-ISI.

También se aprecia que Nueva Zelanda se acerca a Finlandia, mientras que Chile mantiene prácticamente la misma brecha en todo el período. Sin embargo, lo que muestra realmente la gráfica es que las disciplinas en el sistema de Finlandia aparecen más relacionadas que en los otros dos casos. Es necesario remarcar este punto, ya que aunque los tres países abarcan prácticamente el mismo espectro de disciplinas WoS en los últimos años, las relaciones de complemento entre estas parecen verse inhibidas (no desarrolladas) en el caso de Nueva Zelanda, pero mucho más en el caso chileno. Esto queda reflejado en las cartografías de cada país (Fig. 20) construidas con la misma metodología descrita en la sección anterior.

Figura 20
Cartografías del conocimiento en forma comparada



Nota: Para una visión detallada de cada cartografía ver Anexo 2.

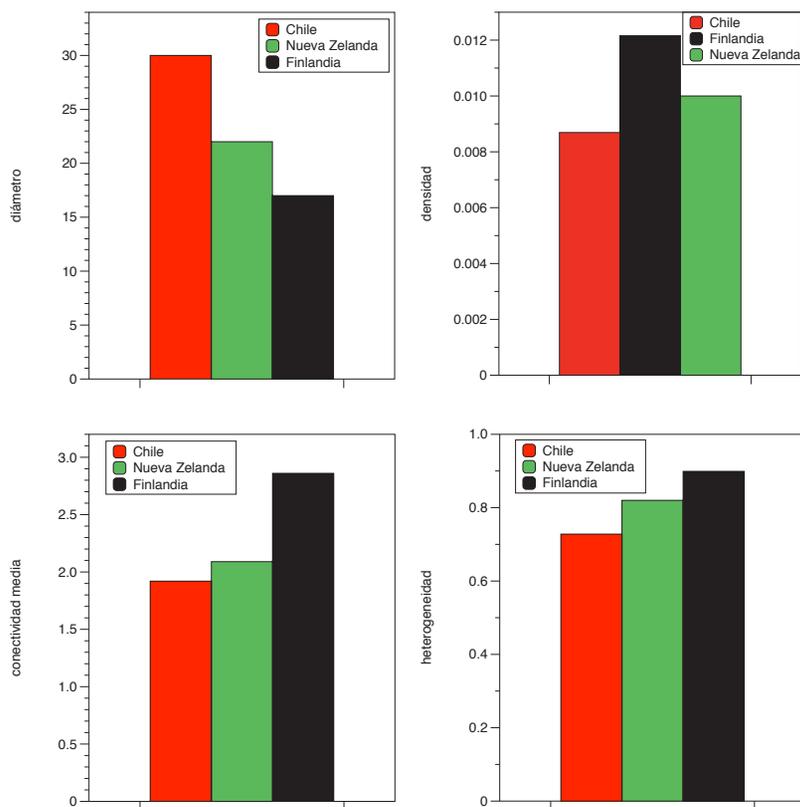
A simple vista es posible notar dos diferencias entre las cartografías generadas. La primera, y más evidente, tiene que ver con la densidad de enlaces de las redes y cómo esta juega un papel determinante en su forma. Tanto Chile como Nueva Zelanda tienen una estructura arborescente, mientras que Finlandia presenta una estructura más compacta.

La otra diferencia es que en el caso chileno, muchas de las relaciones más fuertes entre disciplinas (grosor del enlace) están en la periferia de la red. Tanto en Nueva Zelanda como Finlandia, presentan las relaciones más fuertes en el corazón de la red. Tal como se mencionó en la primera sección de este informe, la estructura de la red resultante del algoritmo *Organic*, se traduce en una red donde la proximidad espacial entre nodos de alguna forma refleja su complementariedad para la construcción de conocimiento. Por esta razón, disciplinas ubicadas en el centro de la red, son disciplinas más cercanas y complementarias al resto. Desde este punto de vista, se hace evidente que en la CCF la proporción de disciplinas que conforma su núcleo (definido como el grupo más cercano al resto) es mucho mayor además de presentar relaciones de complementariedad muy fuertes.

Una de las formas de medir qué tan compacta es la red es mediante el cálculo de su diámetro (tamaño del camino más largo que hay entre un par de disciplinas considerando el conjunto de todos los caminos más cortos entre todos los pares de nodos de la red). El gráfico superior izquierdo de la Figura 21 muestra a Chile como la red más "grande", mientras que la de Finlandia como la más "pequeña", más compacta, con la gran mayoría de disciplinas muy cerca de todas. Nueva Zelanda se ubica en una posición intermedia en este aspecto.

Qué tan compacta es la red se relacionaría con la densidad de enlaces de la cartografía. El gráfico superior derecho de la figura 21, muestra esta medida donde la CCF es muy superior a las de Chile y Nueva Zelanda. Es decir, existen más enlaces entre disciplinas de los potenciales que podrían existir al considerar las disciplinas que la componen¹².

Figura 21
Comparativa de medidas de red



Gráfica superior izquierda: diámetro.

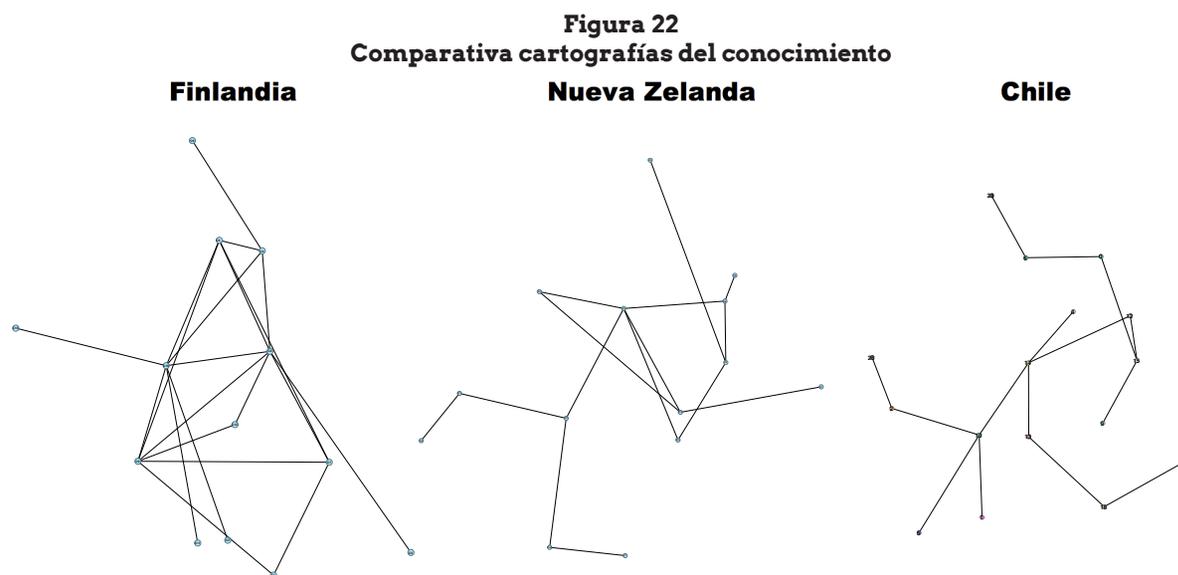
Gráfica superior derecha: densidad.

Gráfica inferior izquierda: conectividad media.

Gráfica inferior derecha: heterogeneidad.

¹² Cabe destacar que aquella diferencia, no tan grande, entre las densidades de las redes disciplinares (Figura 23) de Finlandia y Nueva Zelanda, en este caso se ve magnificada. La explicación es porque después del procedimiento para la construcción de las cartografías, muchas de las relaciones poco significativas son eliminadas. Lo anterior hace evidente que el sistema de relaciones disciplinares de Finlandia presenta un número muy alto de relaciones (c) significativas que son incorporadas a su cartografía después de la aplicación del algoritmo MST. Un número muy inferior de este tipo de relaciones son incorporadas en Chile y Nueva Zelanda.

Otra forma clara de ver esto es comparar la compactación de las cartografías cuando sus comunidades¹³ de disciplinas se muestran agrupadas (colapsadas) en un “macronodo” (Figura 22). En el caso de Finlandia se aprecia que la gran mayoría de comunidades está vinculada a varias más en un entramado muy denso. Lo anterior no se observa en los casos de Nueva Zelanda y Chile donde las comunidades “conversan” siempre con otras pocas.



Nota: Nodos representan conjuntos de disciplinas pertenecientes a la misma comunidad.

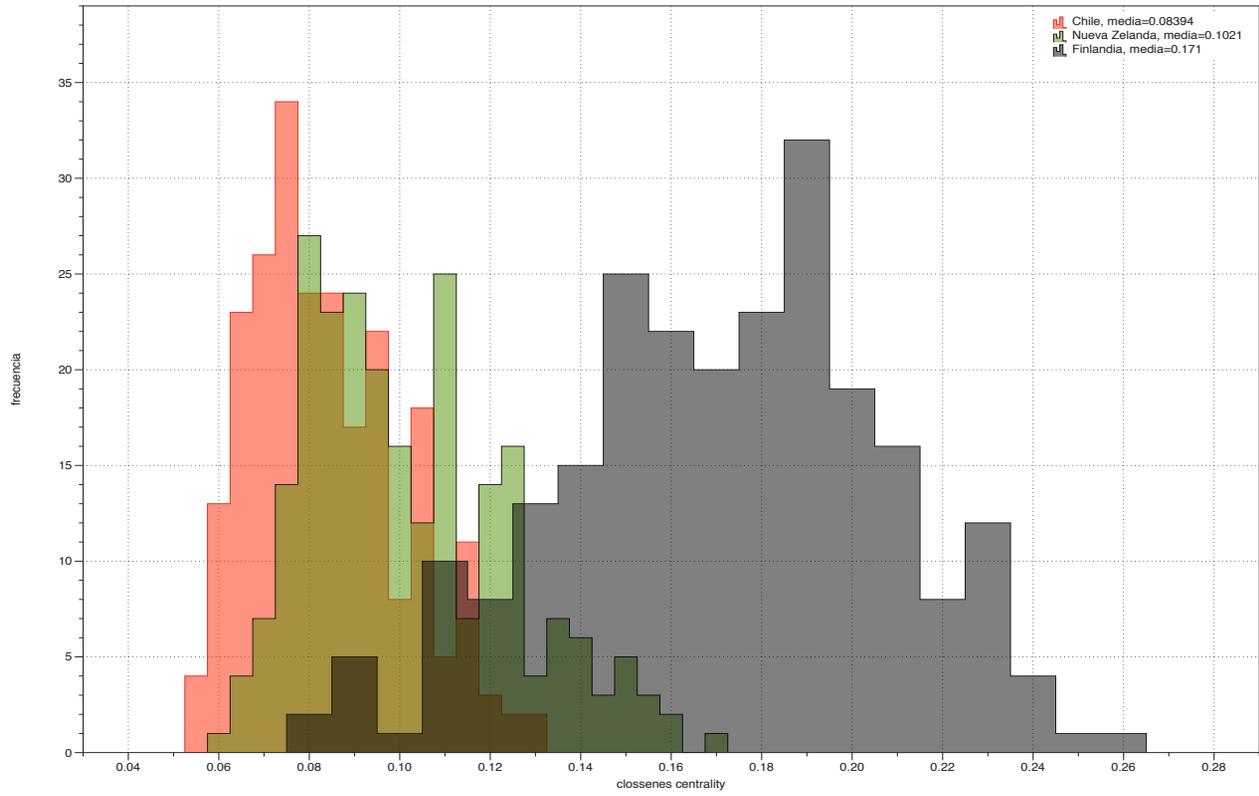
Una alta densidad de enlaces haría que la conectividad promedio de las disciplinas sea también más alta, lo que se muestra en la gráfica inferior izquierda de la Figura 21. En este caso, Nueva Zelanda vuelve a situarse por sobre Chile y bajo Finlandia.

Finalmente, la heterogeneidad de la red, que calcula el coeficiente de variación de la distribución de conectividad de la red y que refleja la tendencia de esta a contener nodos densamente conectados (Dong & Horvath, 2007), muestra a Finlandia como la cartografía más heterogénea, mientras que Nueva Zelanda y Chile se ubican más abajo.

Uno de los aspectos más relevantes que resultan de estas estructuras de red es que modifican el tamaño del núcleo del conocimiento en cada país, es decir, del grupo de disciplinas que aparecen más cercanas al resto como complemento para la generación de conocimiento científico. La Figura 23 muestra los histogramas de la cercanía de las disciplinas para cada cartografía. Se puede ver que en el caso de Finlandia (histograma gris), la cercanía está distribuida entre más nodos de la red, lo que significa que más disciplinas conforman su núcleo del conocimiento, o, tal vez, que realmente no existe tal núcleo ya que el aporte de prácticamente todas las disciplinas al conocimiento del país es muy similar. En el caso de Chile, la alta cercanía está concentrada en pocas disciplinas. Nueva Zelanda nuevamente entre ambos extremos.

13 Detectadas automáticamente mediante el algoritmo propuesto por Blondel et al., 2008.

Figura 23
Histograma de cercanía como complemento para las disciplinas científicas en Chile, Nueva Zelanda y Chile



III. COMPLEJIDAD DEL SISTEMA CONOCIMIENTO. ESTUDIO COMPARADO

Uno de los aportes de este estudio es transformar las propiedades topológicas de las cartografías en una medida de complejidad del sistema de conocimiento de los países. Lo que se está diciendo es que una cartografía con propiedades (topológicas) complejas sería reflejo de un sistema de conocimiento científico sofisticado o técnicamente complejo o avanzado¹⁴. Una medida de complejidad para el sistema se desarrolla a continuación.

Determinar qué tan compleja es cada cartografía es posible gracias a que la complejidad de una red está bien caracterizada en la literatura científica (Newman, Barabási & Watts, 2006). Uno de los principales aspectos relacionados con esta es la presencia de una distribución de conectividad de sus nodos muy distinta a la de una red similar pero con conexiones por azar (red aleatoria), carente de complejidad. Según Barabási (2009), toda la evidencia recogida sobre las redes complejas en las últimas décadas indica que estas convergen en arquitecturas similares, totalmente distintas a las observadas en sistemas cuyos elementos se vinculan de forma trivial, es decir, al azar. En particular, la evidencia apunta a que las redes complejas de distinta naturaleza se alejan de la aleatoriedad con tres tipos de distribución de conectividad: (i) redes libres de escala, con distribuciones de conectividad de sus componentes ajustadas a una ley de potencia, (ii) redes de escala amplia, con distribuciones de conectividad también ajustadas a una ley de potencia pero con un corte o *cutoff* en la conectividad, y (iii) redes de escala única con distribuciones ajustadas a una función exponencial o *gaussiana*.

La gráfica izquierda de la Figura 24 muestra la distribución de conectividades de las disciplinas que componen la CCF. En esta se puede apreciar que la distribución se ajusta mejor a una ley de potencia, p.e., en la escala doble logarítmica del gráfico la distribución sigue una línea recta.

Si bien es una red muy pequeña sin una distribución de "cola larga", es decir, sin la presencia de nodos extremadamente conectados, y por lo tanto sin las propiedades de una red libre de escala, esta red de escala amplia se aleja totalmente de la distribución observada en una red similar pero con conexiones aleatorias (línea discontinua en la imagen). La medida de heterogeneidad (Figura 25) es un reflejo de este fenómeno.

Por otro lado, la distribución sugiere la presencia de jerarquía a todos los niveles de conectividad con disciplinas más conectadas que el resto a todas las escalas, un tipo de organización u ordenamiento bastante particular, ausente en un sistema (ficticio) donde las disciplinas se vinculan sin ningún sentido.

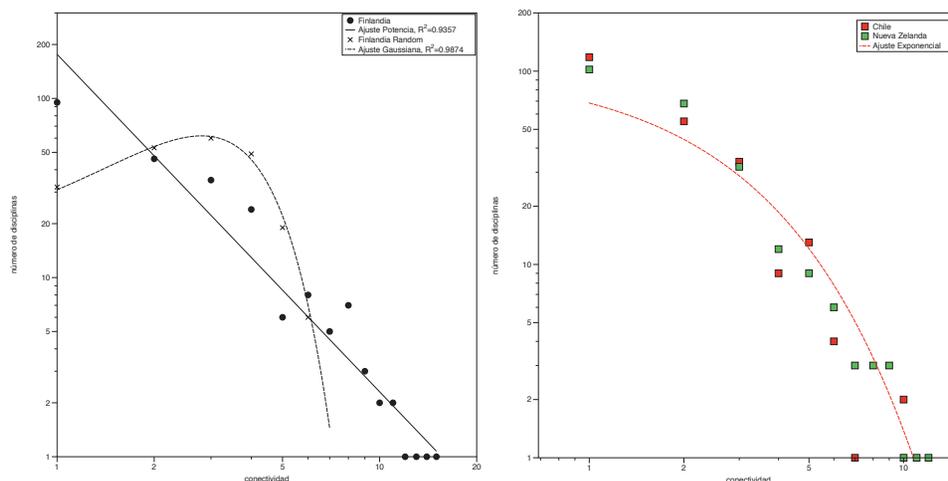
Pero ¿qué sucede en el caso de Chile o Nueva Zelanda? La gráfica derecha de la Figura 24 muestra la distribución de conectividades para sus respectivas cartografías.

Se puede apreciar que la distribución de conectividades es del tipo escala única en ambos casos, ajustándose mejor a una distribución exponencial. Así, la probabilidad de encontrar nodos muy conectados decae más rápido que en el caso de Finlandia. Según Amaral *et al.* (2000) la escala única sería el resultado de restricciones que limitan la adición

14 Tomando en cuenta esta definición, es necesario remarcar que cuando se habla de complejidad o sofisticación en este informe se refiere a la complejidad/sofisticación del sistema, no de sus componentes, las disciplinas. Por lo tanto, este análisis no pretende categorizar el conocimiento disciplinar como más o menos sofisticado, lo que sí se quiere decir es que el sistema de relaciones entre disciplinas, que describe el sistema de conocimiento científico de un país, puede ser más o menos sofisticado en función de una serie de características topológicas bien definidas.

de nuevos enlaces. Redes tecnológicas, por ejemplo, donde el cableado significa costos en materiales, presentan distribuciones con estas caídas fuertes (exponenciales) para la probabilidad de encontrar nodos muy conectados. Es lo que pasaría en Chile y Nueva Zelanda donde, por razones de costos asociados a la complementariedad para generar conocimiento, no aparecen disciplinas muy conectadas en sus cartografías.

Figura 24



Izquierda: Distribución de conectividades de las disciplinas de la CCF y su comparación con una red con el mismo número de nodos y enlaces pero con conexiones aleatorias. Derecha: Distribución de conectividades de las disciplinas en la CCC y CCNZ.

De esto se deduce que Chile y Nueva Zelanda tendrían una cartografía menos compleja que la de Finlandia. Sin embargo, la complejidad de una red tiene también otros atributos. Uno particularmente interesante es que las redes complejas son redes del tipo *Small World* (Watts & Strogatz, 1998). En redes de este tipo, conviven una alta transitividad de conectividad junto a un diámetro muy pequeño.

La transitividad de la red se mide a partir del llamado coeficiente de clustering, que indica qué tan relacionadas están entre sí, en promedio, las disciplinas conectadas a una tercera. El coeficiente de *clustering* promedio para la red de Finlandia es de 0.12, lo que indica que el 12% de las disciplinas conectadas a otra, también lo están entre sí. Para el caso de Nueva Zelanda y Chile, este valor es más bajo: 10% y 2%, respectivamente¹⁵.

Tomando los atributos topológicos para cada cartografía, se propone una medida de la complejidad S del sistema de conocimiento científico para cada país de acuerdo a la siguiente expresión,

$$S = (H + ((1/d) \times C)) \times r$$

¹⁵ Es necesario mencionar que estos valores de transitividad son resultantes de un proceso que incluye la aplicación del algoritmo MST, cuya "misión" es generar una red con coeficiente de clustering igual a 0. La explicación de por qué las cartografías generadas tengan un valor mayor a 0, es porque se añadieron enlaces con frecuencia c significativa.

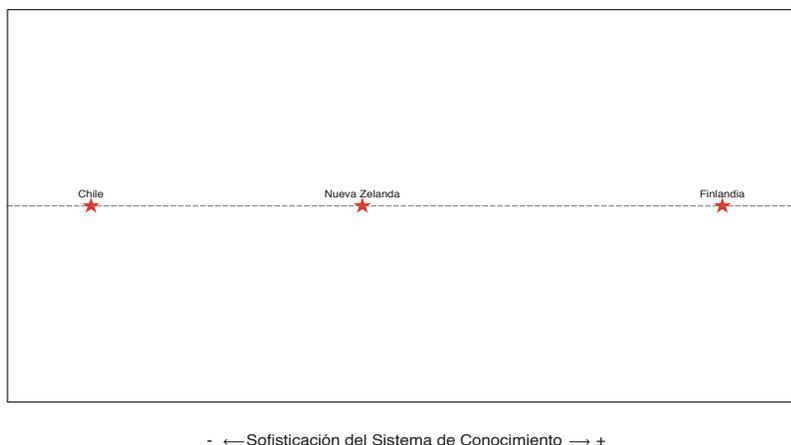
donde H corresponde a la heterogeneidad de la conectividad de sus disciplinas, d al diámetro de la red, C al coeficiente de *clustering* medio de la red y r a la frecuencia promedio de relación entre disciplinas. La primera parte de la ecuación representa la complejidad topológica de la red, mientras que la segunda, determinada por el valor de r , refleja la fuerza con que las disciplinas se vinculan.

De esta forma una cartografía de conocimiento será más compleja si presenta mayor heterogeneidad en la distribución de conectividad de sus disciplinas, estas están en promedio muy cerca una de otras (diámetro pequeño) y sus relaciones presentan alta transitividad y son de alto peso.

La Figura 25 muestra la posición de los tres países en un continuo de sofisticación/complejidad de acuerdo a la ecuación, donde Nueva Zelanda aparece entre Chile y Finlandia, esta última con un sistema de conocimiento más sofisticado, donde la complementariedad disciplinar para crear conocimiento científico es parte de un sistema denso, de fácil comunicación y jerarquizado (ordenado).

Es necesario decir que obviamente Chile y Finlandia no son los extremos de este continuo ya que sólo se han analizado tres casos, otros países podrán ubicarse antes, después o en medio de los estudiados, dependiendo de la arquitectura de relaciones de sus disciplinas científicas.

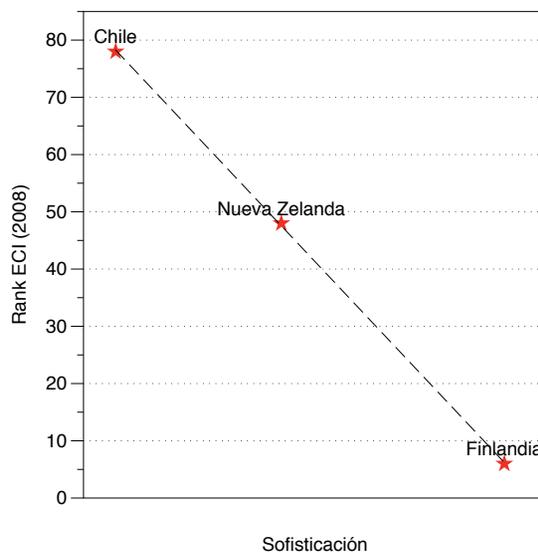
Figura 25
Posición de Chile, Nueva Zelanda y Finlandia según grado de sofisticación de sus respectivos sistemas de conocimiento científico



Nota: El continuo de sofisticación no tiene unidades, pero la posición de los tres países representa su valor S de acuerdo a la ecuación.

Es posible observar una coincidencia entre la medida de complejidad propuesta y el Índice de Complejidad Económica (ECI en inglés) (para mayor detalle ver Hausmann & Hidalgo, 2014) (Fig. 26). El EIC es una medida de la complejidad de las economías de los países, obtenido a partir de las actividades que estos desarrollan. La idea tras el índice es que el crecimiento económico de un país está determinado por su conocimiento productivo. Así, un conocimiento productivo complejo, relacionado con una producción más diversa y menos ubicua, aporta al ECI.

Figura 26
Complejidad del sistema de conocimiento en relación al ranking EIC de cada país el año 2008



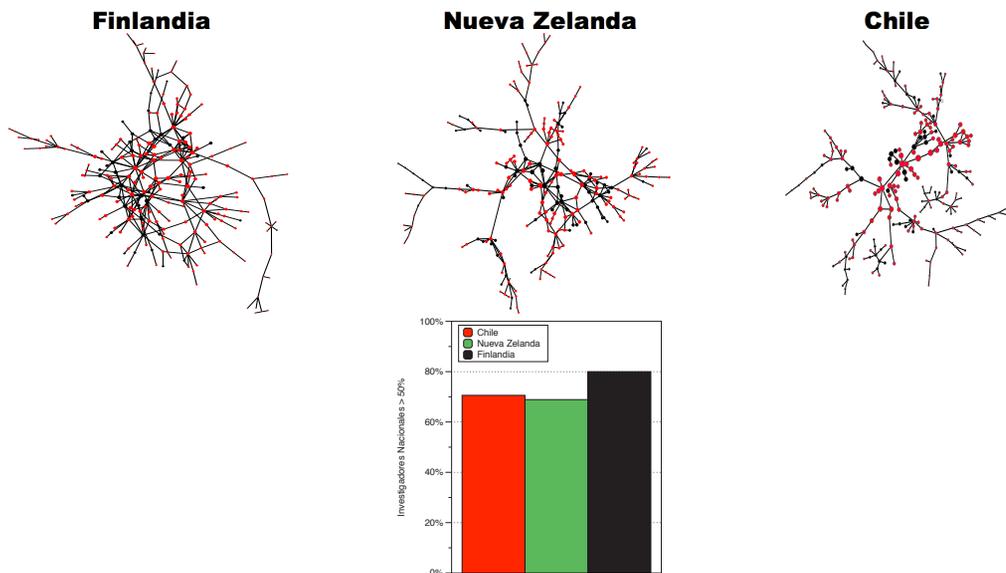
Nota: el ranking EIC es mejor mientras más bajo.

En un aspecto distinto de las cartografías, la Figura 27 muestra que Finlandia tiene un porcentaje superior (80%) de disciplinas desarrolladas principalmente por autores nacionales. Chile y Nueva Zelanda tienen una proporción más importante de artículos con coautoría extranjera, sobre todo en aquellas disciplinas más centrales en el caso de Nueva Zelanda.

Tanto en el caso de Finlandia como en el de Nueva Zelanda las disciplinas más centrales en sus respectivas cartografías son también las de mayor producción (Fig. 28). En ambos casos, ellas representan el núcleo del conocimiento, lo que sumado a la presencia de enlaces de alta frecuencia en sus núcleos de conocimiento, jugaría un papel muy positivo en sus respectivos sistemas de conocimiento científico. Algo distinto sucede en Chile, donde no parece existir ninguna tendencia entre producción disciplinar y posición estratégica en la cartografía, incluso, una de las disciplinas más periféricas en la construcción de conocimiento, es la de mayor producción de artículos.

A partir de los resultados expuestos en esta sección, parece interesante analizar cuáles son los potenciales del sistema de conocimiento en Chile conociendo las reglas de juego impuestas por la cartografía. Este es el desafío de la última sección de este informe.

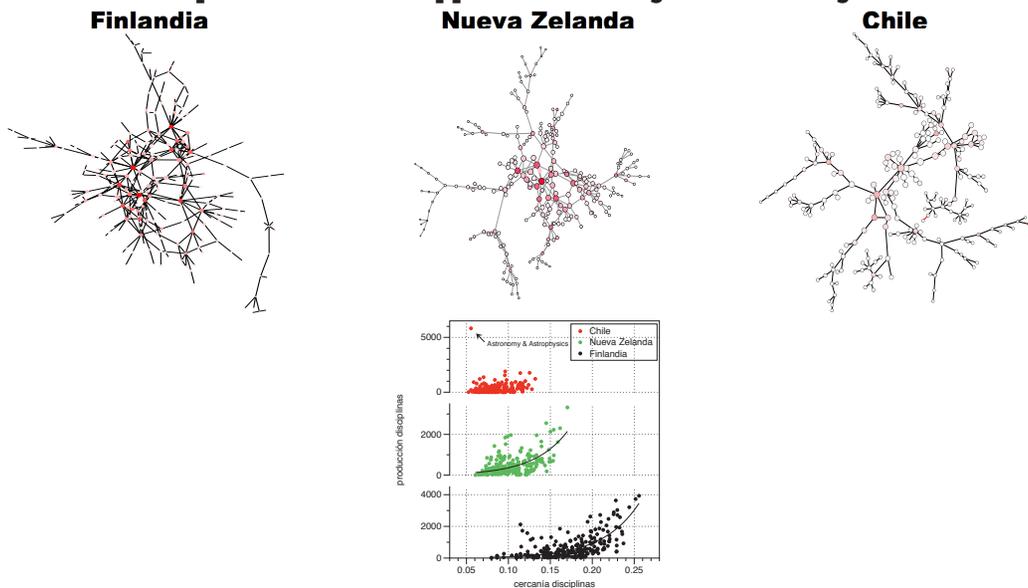
Figura 27
Proporción de autores "nacionales" como autores de artículos científicos en Chile, Nueva Zelanda y Finlandia. Período 2004-2014



Nodos de color rojo indican disciplinas donde esta proporción es superior al 50%. Nodos de color negro, en el caso contrario. Tamaño de los nodos es según cercanía.

Gráfica inferior muestra la proporción total de disciplinas con participación principalmente nacional.

Figura 28
Disciplinas: Producción y posición estratégica en la cartografía



Color de nodos indica producción (escala blanco -> rojo). Tamaño de los nodos según cercanía. Gráfica inferior muestra la relación entre producción y cercanía para las disciplinas de los tres países.

Principales hallazgos de la sección B

1. La comparación entre las cartografías de Chile con la de Nueva Zelanda y Finlandia, muestra el mayor grado de complejidad del sistema de conocimiento en esta última. La correlación positiva del indicador de complejidad con el Índice de complejidad Económica (ECI) estaría indicando que, de alguna manera, la diversificación productiva incide en la demanda de conocimiento y en la complejidad de su sistema.
2. La política de innovación en Finlandia, central a su política industrial, podría también haber incidido en la compacta y jerárquica estructura de su cartografía del conocimiento (esta relación debiera ser objeto de una investigación futura), la que ahora se ve a su vez potenciada por la misma sofisticación del sistema de conocimiento científico. De esta forma se generaría un círculo virtuoso donde un sector productivo sofisticado demanda del académico y este ve en el otro un receptor de su actividad.
3. Asimismo, la menor complejidad detectada en las cartografías de conocimiento científico de Nueva Zelanda y Chile, iría a la par de un sistema productivo menos complejo, centrado principalmente en la explotación de recursos naturales. En el caso de Chile, el predominio histórico de la adopción de tecnología mediante la importación de maquinarias y equipos, y *know-how* importado, así como una estrategia de innovación poco agresiva, podrían no haber estimulado el desarrollo de un sistema de conocimiento científico de mayor complejidad.
4. La mayor dificultad en la generación de complementariedad entre las disciplinas científicas en Chile y Nueva Zelanda muestra un predominio de relaciones poco significativas entre disciplinas, a diferencia de Finlandia donde el complemento sistemático y frecuente entre diversos pares de disciplinas da origen a una intrincada red de conocimientos.
5. Chile o Nueva Zelanda no necesariamente alcanzarán la complejidad de Finlandia. Ello requiere de políticas de ciencia y tecnología que creen un ambiente adecuado que estimule la convergencia entre la oferta de conocimiento científico-tecnológico y la demanda del sector productivo.

C. Potencialidades del sistema de conocimiento nacional

En la sección anterior se propuso que la complejidad de un sistema de conocimiento científico está determinada por el número de relaciones significativas entre disciplinas y cómo estas se distribuyen. Con el objetivo de explorar cómo puede aumentar la complejidad del sistema de conocimiento en Chile, en esta sección se desarrollan una serie de experimentos que miden los cambios en su sofisticación cuando se añaden determinados vínculos¹⁶. Para esto se tomaron dos caminos: (i) detectar vínculos potenciales y (ii) optimizar la complejidad/sofisticación para detectar vínculos que la maximicen.

I. COMPLEJIDAD INDUCIDA POR POTENCIALIDAD

Para establecer qué vínculos son potenciales se estableció en primer lugar una medida de masa crítica por disciplina, definida como aquel valor que considera su nivel de producción, de impacto y el número de autores para cada disciplina i según:

$$MC_i = [(p_i/P) + (c_i/C) + (r_i/R)]$$

donde p_i es el número de publicaciones de la disciplina i en el período 2008-2014, c_i es el número de citas totales de la disciplina i en el mismo período, y r_i el número de autores al año 2014 para la disciplina i . Los valores de P , C y R son las publicaciones, citas y autores totales para todo el período y todas las disciplinas.

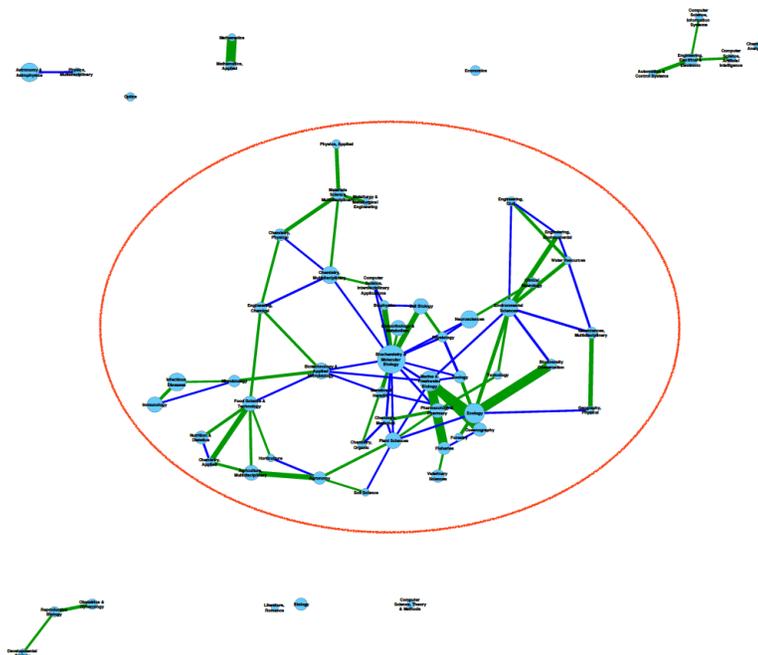
La idea tras la medida de masa crítica es garantizar que aquellos vínculos detectados como potenciales tengan mayor probabilidad de éxito por estar compuestos por disciplinas fuertes en el contexto nacional.

La detección de un vínculo potencial entre dos disciplinas considera tres criterios topológicos: (i) la robustez del vínculo, medida por la frecuencia de su relación, (ii) la cercanía a otros vínculos pertenecientes a la ya establecida CCC actual, y (iii) la pertenencia a la componente conectada mayor de la red (para mayor detalle ver Anexo 3).

La Figura 29 muestra la red con los enlaces potenciales (azules) detectados empleando los criterios antes señalados.

¹⁶ Los enlaces añadidos ya han sido desarrollados en el país aunque no forman parte de la CCC por la metodología descrita en la primera sección de este informe.

Figura 29
Red con enlaces potenciales



Nota: Componente mayor (marcada por círculo rojo) contiene los enlaces potenciales (azules). Enlaces verdes corresponden a los de la cartografía de conocimiento.

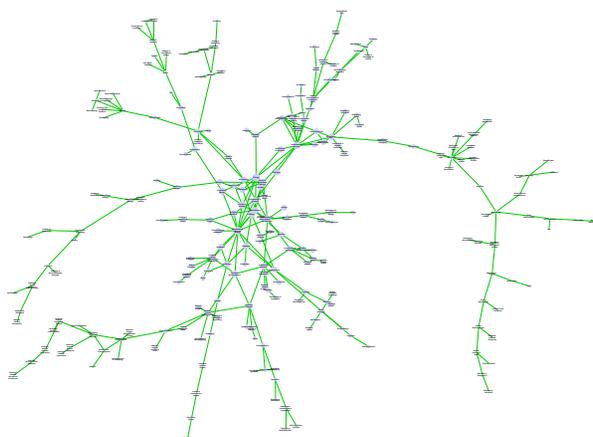
Con el método propuesto se obtuvieron 38 enlaces potenciales:

1. Ciencias de la Computación Aplicaciones Interdisciplinarias ↔ Bioquímica y Biología Molecular
2. Ciencias Ambientales ↔ Conservación de la Biodiversidad
3. Ecología ↔ Bioquímica y Biología Molecular
4. Zoología ↔ Fisiología
5. Meteorología y Ciencias Atmosféricas ↔ Geociencias, Multidisciplinar
6. Química Orgánica ↔ química Medicinal
7. Biofísica ↔ Biología Celular
8. Tecnología de los Alimentos ↔ Biotecnología y Microbiología Aplicada
9. Ecología ↔ Geografía, Física
10. Botánica ↔ Biología Marina
11. Química, Multidisciplinar ↔ ingeniería, Química
12. Zoología ↔ Biología Marina
13. Biotecnología y Microbiología Aplicada ↔ Biología Marina
14. Ciencias Ambientales ↔ Geociencias, Multidisciplinar
15. Biotecnología y Microbiología Aplicada ↔ Genética y Herencia
16. Pesca ↔ Oceanografía
17. Nutrición y Dietética ↔ química Aplicada

18. Química Medicinal ↔ Bioquímica y Biología Molecular
19. Fisiología ↔ Bioquímica y Biología Molecular
20. Bioquímica y Biología Molecular ↔ Biotecnología y Microbiología Aplicada
21. Zoología ↔ Bioquímica y Biología Molecular
22. Ecología ↔ Ciencias Vegetales
23. Bioquímica y Biología Molecular ↔ Farmacología y Farmacia
24. Ecología ↔ Genética y Herencia
25. Neurociencias ↔ Bioquímica y Biología Molecular
26. Recursos del Agua ↔ ingeniería, Medio Ambiente
27. Botánica ↔ Bioquímica y Biología Molecular
28. Biofísica ↔ Ciencias de la Computación, Aplicaciones Interdisciplinarias
29. Ingeniería, Civil ↔ ingeniería, Medio Ambiente
30. Ciencias Ambientales ↔ Biología Marina
31. Ciencias Ambientales ↔ ingeniería, Civil
32. Neurociencias ↔ Fisiología
33. Química, Multidisciplinar ↔ Bioquímica y Biología Molecular
34. Bioquímica y Biología Molecular ↔ Biología Evolutiva
35. Botánica ↔ química Medicinal
36. Recursos Hídricos ↔ Geociencias, Multidisciplinar
37. Química, Física ↔ Química, Multidisciplinar
38. Microbiología ↔ Inmunología

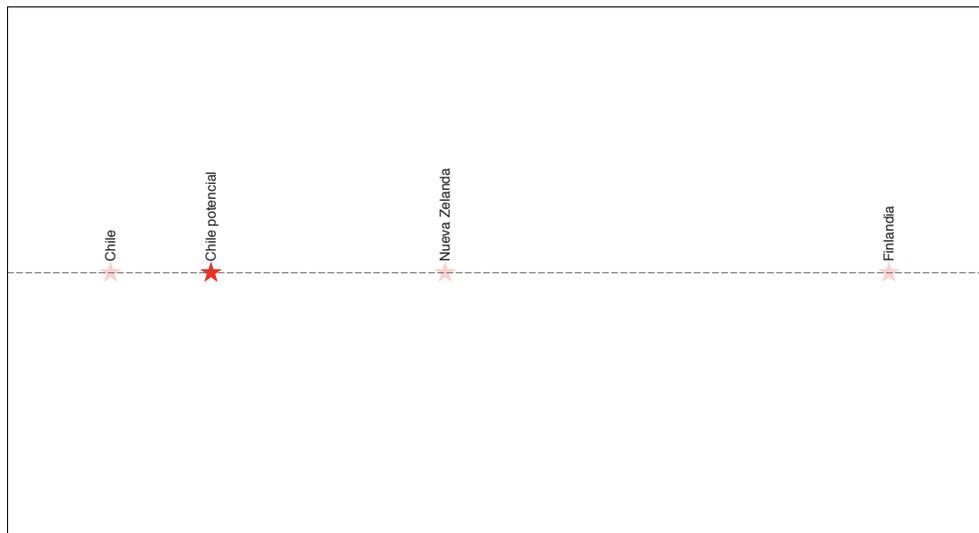
La incorporación de estos vínculos potenciales, ya desarrollados en Chile pero ausentes en la CCC, genera una alteración fuerte en la red (Fig. 30).

Figura 30
Cartografía del conocimiento chileno Potencial
G(236,279)



Si bien visualmente no parecen existir grandes diferencias con la cartografía original (Figura 12, Sección A), en la nueva cartografía el diámetro de la red se reduce en 6 unidades, la densidad de la red aumenta en un 20%, el *clustering* promedio es 4 veces mayor y la heterogeneidad aumenta en un 20%. Con estos nuevos valores, Chile se ubicaría por sobre Nueva Zelanda y muy cercana a Finlandia en el continuo de complejidad/sofisticación. Sin embargo, es necesario recordar que las características topológicas de la red son una parte de la complejidad definida anteriormente. Esta última le da importancia también al grado de complemento entre disciplinas, es decir, al peso de las relaciones entre disciplinas. Es por esto que con estos 38 enlaces la complejidad de la CCC aumenta acercándola a la de Nueva Zelanda como se muestra en la Figura 31.

Figura 31
Complejidad potencial del sistema de conocimiento chileno y su posición respecto a dos países de comparación en un escenario en que estos no han sufrido cambios



- ← Sofisticación del Sistema de Conocimiento → +

En un escenario de recursos limitados donde la priorización de estrategias es clave, algunos de estos 38 enlaces pueden tener mayor potencialidad, dependiendo de ciertos criterios. La dependencia histórica y geográfica del conocimiento en Chile, expuesta en la primera sección de este informe, entrega herramientas para esta priorización.

El primero de los criterios que puede tomarse en cuenta se relaciona con la ciencia aplicada, ya que esta representa su vínculo con el sector productivo, que representa la demanda potencial por conocimiento hacia los investigadores. En Chile, los proyectos FONDEF son creados explícitamente para la ciencia aplicada. El Cuadro 10 muestra la cantidad de publicaciones asociadas a este programa por sector de aplicación según la base de datos de CONICYT para el período 1994-2014.

De acuerdo a esta información, de los 38 enlaces potenciales propuestos, puede prestarse especial atención a aquellos que involucran a una o dos disciplinas relacionadas con aplicaciones agropecuarias, de pesca y acuicultura, mineras, tecnologías de información, entre otras, ya desarrolladas en el país.

Un segundo criterio para la priorización es el carácter multidisciplinar de los enlaces. En este caso, la opción se reduce a 18 enlaces potenciales que generarían un lazo entre disciplinas “alejadas”¹⁷. La consideración de este factor responde al objetivo de la densificación de la red a mediano y largo plazo, ya que el hecho de generar puentes entre disciplinas “lejanas” aumenta la complejidad del sistema de conocimiento.

Cuadro 10
Publicaciones asociados al programa FONDEF-CONICYT 1994-2014 según Sectores de Aplicación

SECTOR	TOTAL
AGROPECUARIA	80
PESCA Y ACUICULTURA	79
TICS	74
SALUD	69
MINERIA	62
MANUFACTURA	52
FORESTAL	39
EDUCACION	14
ACUICULTURA MUNDIAL	8
ENERGIA Y AGUAS	5
CENTRO TIC	3
GENOMICA RNR	2
MAREA ROJA	2
INFRAESTRUCTURA	1

Fuente: Programa de Información Científica CONICYT.

Un tercer criterio son áreas con necesidades urgentes y concretas del país, como serían por ejemplo los enlaces relacionados con el manejo de recursos hídricos, o aquellos que relacionan la pesca y/o la agricultura con Biotecnología.

Un último criterio es seleccionar dentro de estos enlaces potenciales aquellos relacionados con sectores productivos conocidos por ser altamente innovadores y en particular relacionados a la generación de patentes. Esto sería el caso de los enlaces entre ciencia vegetal y la química medicinal por ejemplo, como también aquellos que relacionan la agricultura con biotecnología o bioquímica donde Chile tiene bastante hecho¹⁸.

¹⁷ Para mayor detalle ver Anexo 5

¹⁸ Ver número especial de *Nature* 510(7504).

Un punto importante a tener en cuenta en este tipo de análisis es lo difícil que resulta dimensionar los efectos que tiene sobre la complejidad del sistema de conocimiento el agregar uno o más enlaces siguiendo uno o más criterios de los antes mencionados. No hay un laboratorio de pruebas para tantear tales efectos.

II. COMPLEJIDAD INDUCIDA POR OPTIMIZACIÓN

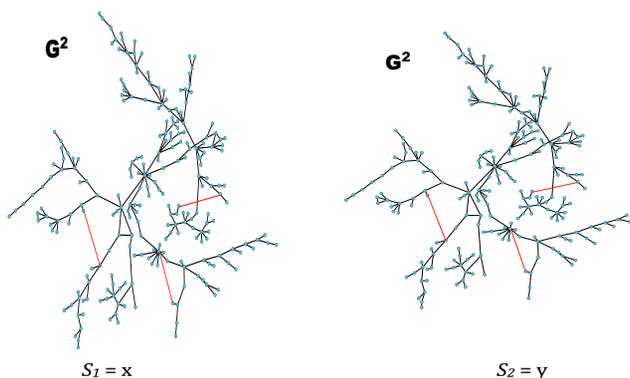
Una de las herramientas para solucionar problemas de este tipo es aplicar un mecanismo automático que busque por configuraciones óptimas en términos de complejidad para el sistema de conocimiento actual. Para esto se implementó un Algoritmo Genético (GA, por su traducción al inglés), usado para encontrar soluciones a problemas como este mediante principios similares a los de la evolución biológica donde aquellos individuos con mejores características (*fitness*) tienen mayor probabilidad de traspasar sus genes a generaciones futuras (para mayor detalle del algoritmo implementado ver Anexo 4).

En un GA, dos individuos, correspondientes en este caso a dos cartografías con m enlaces sumados al azar desde un conjunto de enlaces (Fig. 32), se cruzan para obtener descendientes, que en teoría estarán mejor adaptados que sus padres, es decir con una complejidad superior.

Para decir esto último, cada individuo es evaluado mediante una función *fitness* correspondiente a la ecuación de sofisticación de la sección anterior, determinando su futuro, o no, como padre.

Fig. 40. Dos individuos, G1 y G2, obtenidos luego de añadir $m=3$ enlaces al azar (color rojo) a la cartografía de conocimiento chileno. Los enlaces fueron escogidos dentro de los que se han dado en el período 2004-2014 entre disciplinas científicas en Chile. Cada individuo tiene un valor de sofisticación S . El algoritmo genético buscará mediante cruce, mutación y selección aquella configuración de la cartografía, con m enlaces nuevos, que maximice el valor de S .

Figura 32
Ejemplo de dos individuos, G1 y G2, del algoritmo genético obtenidos luego de añadir $m=3$ enlaces al azar (color rojo) a la CCC

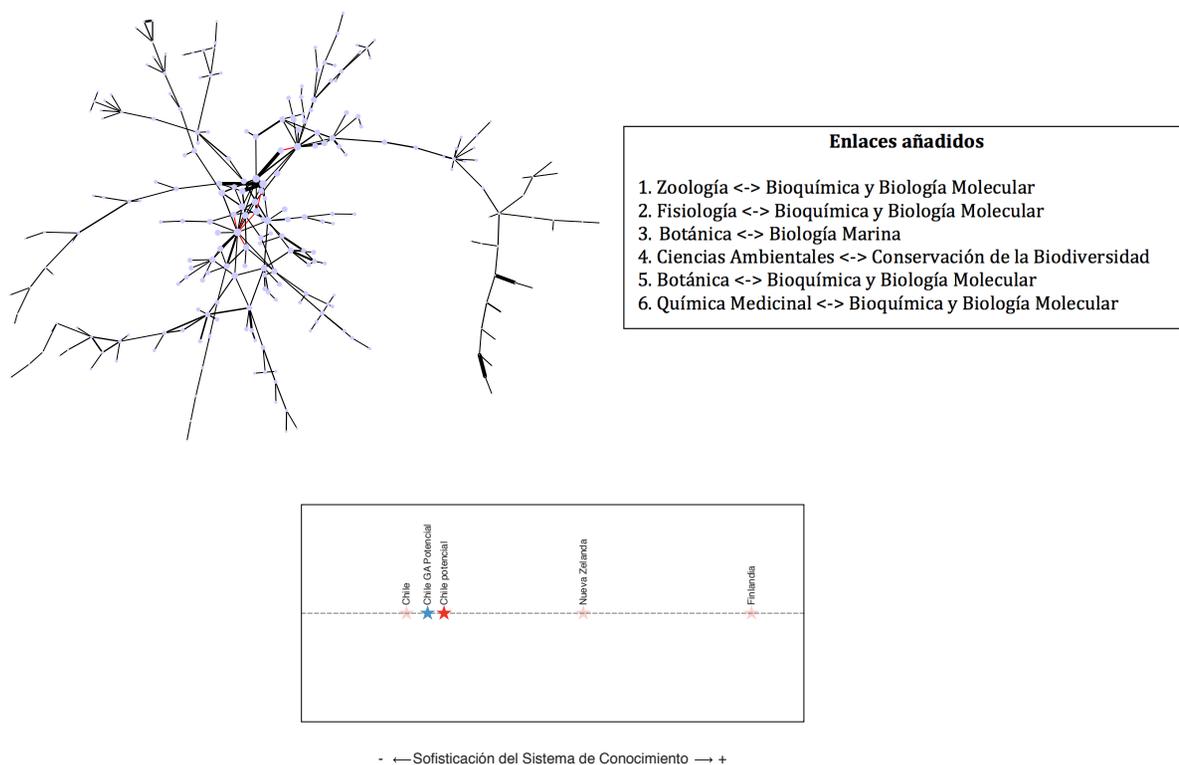


Los enlaces fueron escogidos dentro de los que se han dado en el período 2004-2014 entre disciplinas científicas en Chile. Cada individuo tiene un valor de sofisticación S . El algoritmo genético buscará mediante cruce, mutación y selección aquella configuración de la cartografía, con m enlaces nuevos, que maximice el valor de S .

El GA se aplicó en el siguiente escenario: dado el conjunto de 38 enlaces potenciales detectados en esta sección, escoger una configuración de unos pocos que aumente la complejidad del sistema.

Los resultados del GA muestran su utilidad al momento de priorizar enlaces y testear su efecto en la sofisticación del sistema de conocimiento. Pensando en un escenario de recursos limitados, incluir sólo 6 enlaces, de los 38 con mayor potencial, también tiene un efecto significativo sobre la estructura de la cartografía (Fig. 33). De hecho, la complejidad del sistema (★ Chile GA Potencial) se ubica más cerca de la complejidad alcanzada con la incorporación de los 38 enlaces (★ Chile Potencial) que sin ellos (★ Chile).

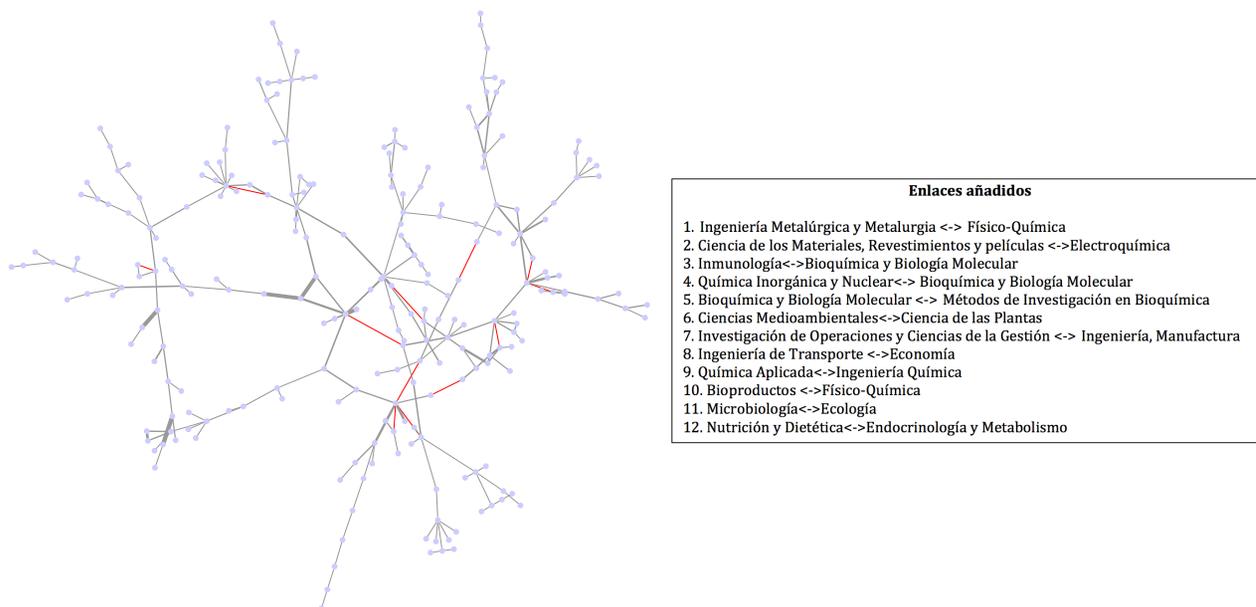
Figura 33



Arriba: cartografía del conocimiento chileno con $m=6$ enlaces añadidos (color rojo), $G'(236,247)$, de acuerdo a la configuración óptima encontrada por el GA dados los 38 enlaces potenciales. Abajo: Posición del sistema de conocimiento chileno en el continuo de sofisticación después de añadir los $m=6$ enlaces potenciales (estrella azul).

No obstante, es necesario mencionar que si bien estos vínculos tienen potencialidad, y su inclusión aumenta la complejidad del sistema, su elección responde a criterios de dependencia histórica y/o geográfica, por lo tanto las posibilidades de que el panorama actual mantenga el *status quo* es alta. La transformación radical de la complejidad del sistema debe ser inducida en una dirección distinta y el GA puede dar pistas para esto. Por ejemplo, pidiéndole al GA explorar un escenario para encontrar una configuración de enlaces que aumente sólo la complejidad topológica de la red. La Figura 34 muestra los resultados.

Fig. 34
Cartografía del conocimiento chileno con m=12 enlaces añadidos (color rojo), $G'(236,253)$, de acuerdo a la configuración óptima encontrada por GA dados todos los enlaces entre disciplinas que han sido desarrollados en Chile en el período 2004-2014 buscando sólo un óptimo topológico.



Se observa el efecto de dejar operar al GA de forma más libre. Como ya no existe la imposición de optimizar la topología junto a la frecuencia de enlaces (p.e., contexto nacional), el algoritmo pudo encontrar configuraciones con vinculaciones débiles (ver que los enlaces rojos de la figura son de menor peso). El resultado de esto es una red de mayor complejidad donde todas las disciplinas están más cerca debido a enlaces-puente que conectan sectores antes aislados de la red como son por ejemplo: "Microbiología ↔ Ecología" y "Ciencia de Materiales, Revestimientos y Películas ↔ Electroquímica".

Esta aplicación podría ser útil pensando en encontrar aquellos vínculos que, si bien puede que no tengan alto potencial ni una gran historia de relaciones en el país, hagan del sistema de conocimiento una donde las disciplinas estén más cercas unas de otras.

Principales hallazgos de la sección C

1. En esta sección se considera la cartografía del sistema científico en Chile como el punto de partida estructural sobre el cual puede “inducirse” una estructura futura. En base a este punto de partida, se determinan enlaces potenciales a desarrollar, así como las configuraciones posibles, susceptibles de aumentar la complejidad de la red.
2. En base a la inducción de la complejidad mediante potencialidad, se determinaron 38 enlaces para incorporar a la red. Sin embargo ello no es trivial en su implementación y obviamente conlleva un costo, por lo que se deben determinar criterios de selección.
3. Los resultados sugieren que aún incorporando todos los enlaces potenciales detectados, la sofisticación del conocimiento en Chile requiere ser más robusta para alcanzar a otros países, es decir, no sólo importa la complejidad topológica de la estructura, también la frecuencia de los enlaces que la componen. Finlandia y Nueva Zelanda tienen, en promedio, mucha mayor robustez que Chile, lo cual también muestra la fragilidad del sistema chileno actual.
4. El aumento de la complejidad del sistema también puede ser obtenido con la incorporación de algunos pocos enlaces estratégicos, tomando en cuenta criterios tales como: (i) la coyuntura del país en un momento determinado (p.e., necesidad de investigar sobre recursos hídricos donde vínculos disciplinares como “Recursos Hídricos ↔ ingeniería Ambiental” parecen importantes); (ii) la investigación aplicada ya desarrollada en el país (p.e., usar la dependencia geográfica detectada entre la ciencia y los sectores productivos de una región, sería un criterio para escoger vínculos como “Pesca ↔ Oceanografía”); o (iii) experiencias exitosas en el patentamiento vegetal donde vínculos como “Botánica ↔ Bioquímica y Biología Molecular” parecen tener un gran potencial.

D. Conclusiones

Este documento expone los resultados de la investigación: “Cartografía del conocimiento en Chile”, abriendo un camino al estudio de la estructura del conocimiento científico nacional.

Comprender cómo evoluciona y se articula la capacidad nacional para la generación del conocimiento, permite identificar potenciales del saber científico que pudieran en el futuro ser traducidos en nuevos procesos y productos, y contribuye al diseño de políticas para el fomento de la investigación, desarrollo tecnológico e innovación. De hecho, el conocimiento científico realizado en Chile muestra coincidencia con los principales sectores productivos desarrollados en cada región, lo que representa una indicación de las capacidades de investigación ya instaladas en regiones, pudiendo servir este conocimiento a futuras articulaciones de políticas públicas.

La cartografía del conocimiento chileno desarrollada, se basa en las relaciones de complementariedad entre las disciplinas científicas, condición fundamental para el avance del conocimiento. Su comparación con aquellas de dos países de interés, que han sido *benchmark* en varias áreas de la tecnología y del conocimiento, como Finlandia y Nueva Zelanda, ha permitido a su vez evaluar el grado de complejidad del sistema del conocimiento científico en Chile. Para ello se elaboraron indicadores y se desarrolló una metodología para el análisis de la sofisticación/complejidad de este.

La comparación de la cartografía del conocimiento chileno con aquellas de Finlandia y Nueva Zelanda permitió comprobar que Chile presenta indicadores de complejidad inferiores a ambos países. En Finlandia, la generación de nuevo conocimiento habría superado el alto costo de producción característico de las primeras etapas, ya que se encuentra en las fases de reproducción y distribución de este. No sería el caso chileno ni neozelandés.

El estudio evidenció que en el núcleo del conocimiento científico chileno (determinado a partir de la cercanía topológica entre disciplinas en la cartografía) se encuentran varias disciplinas científicas relacionadas con los recursos naturales, tales como Ciencias Medioambientales, Ecología, Biodiversidad, Ciencias del Mar y de la Tierra, disciplinas Agrícolas, Mineras y Ciencias de la ingeniería. En Chile, al igual que en América Latina, los sectores productivos asociados a la explotación de recursos naturales han sido poco intensivos en generación de conocimiento, a diferencia de países intensivos en recursos naturales que lograron desarrollarse y cuyas compañías invirtieron en I+D en importantes laboratorios (Niosi, 2000). Una situación similar a la detectada a nivel país, apareció a nivel regional. El estudio detectó que la producción científica disciplinar de las regiones de Chile, medida por el número de investigadores afiliados a la región y por el número de artículos, coinciden con áreas productivas regionales, como por ejemplo Botánica y Agricultura Multidisciplinar en el Maule, o Metalurgia y minería en Atacama, asociadas también a los recursos naturales. De lo anterior se puede entender la coincidencia entre la complejidad del sistema de conocimiento científico nacional y la complejidad económica (Hausmann *et al.*, 2014) de su sector productivo. Lo anterior permite plantear la hipótesis sobre la existencia de un estrecho vínculo entre el sector productivo y la generación de conocimiento.

El estudio muestra además que, aún cuando Nueva Zelanda presenta una estructura productiva similar a la chilena, la complejidad de su sistema de conocimiento científico es superior. Esto lleva a pensar en el impacto de políticas de investigación y desarrollo (I+D) para la sofisticación del sistema de conocimiento, que en el caso de Nueva Zelanda han sido más efectivas.

El estudio también sugiere que no sólo importan los niveles de producción o la calidad de la investigación realizada en Chile, ambos aspectos bien logrados en muchos casos, sino que debe tomarse especialmente en cuenta la forma en la cual el conocimiento se vincula para generar nuevas capacidades para investigar. La potencialidad del conocimiento científico está en sus vínculos y, por lo tanto, las políticas debieran favorecerlos.

La comparación con Finlandia evidencia que se requieren nuevos desafíos del aparato productivo chileno, que al traducirse en preguntas para la ciencia, den paso a núcleos interdisciplinarios capaces de generar las respuestas requeridas, de esta forma se retroalimentaría la complejidad del sistema productivo y del conocimiento. Si esto es así, una batería de políticas que estrechen el vínculo entre la industria y/o servicios productivos y la academia pasa a ser fundamental para la sofisticación del sistema de conocimiento científico en Chile.

El hecho de que la cartografía de Chile muestre una escasa densidad de vínculos, incluso en el núcleo del sistema, también sugiere la hipótesis de posibles fallas de políticas en el sistema de ciencia y tecnología chileno. Sin ahondar mucho en el tema, la falta de incentivos a la investigación colaborativa e interdisciplinaria, derivada, entre otras causas, de las actuales reglas establecidas para el financiamiento de la investigación en las universidades, es un factor que no se puede obviar. Por otra parte si es a través de los centros de excelencia que ocurre la investigación interdisciplinaria, fenómeno que amerita también una investigación, las recomendaciones de política irían a fortalecer el financiamiento de los mismos.

El mirar y entender el conocimiento científico como parte de un Sistema Complejo Adaptativo arroja tal vez uno de los resultados más interesantes que sugiere que la dinámica "natural" del sistema de conocimiento chileno no lo conducirá necesariamente a un estado de complejidad como el observado en países desarrollados, denso en vínculos y con alta capacidad de generar nuevas áreas de conocimiento. Muy por el contrario, su dinámica lo haría profundizar más en lo mismo, debido a mecanismos de ventaja acumulativa que opacarían la exploración del sistema. Esperar más o menos tiempo a que el sistema científico se complejice en una dirección como la de Finlandia, por su propia cuenta, no parece pertinente, por lo que la alternativa, como ha ocurrido en países con conocimiento de frontera, es la aplicación de políticas de investigación y desarrollo y de incentivos para la demanda de nuevo conocimiento, más agresivos y dirigidos que los prevalecientes en la actualidad.

El estudio muestra algunas alternativas para aumentar la complejidad del sistema chileno. Ello puede ser obtenida con la potenciación de algunos pocos enlaces estratégicos, tomando en cuenta criterios tales como: (i) la coyuntura del país en un momento determinado (p.e., necesidad de investigar sobre Recursos Hídricos donde vínculos disciplinares como "Recursos del Agua ↔ ingeniería Ambiental" parecen importantes); (ii) la investigación aplicada ya desarrollada en el país (p.e., usar la dependencia geográfica detectada entre la ciencia y los sectores productivos de una región, sería un criterio para potenciar vínculos como "Pesca ↔ Oceanografía"); o (iii) experiencias exitosas en el patentamiento vegetal donde vínculos como "Botánica ↔ Bioquímica y Biología Molecular" parecen tener potencial.

No obstante, cualquier intento por complejizar el sistema de conocimiento científico no será efectivo si no encuentra recepción en el sistema productivo. Lo mismo aplica en el sentido contrario.

Finalmente, esta investigación ha abierto nuevos temas de investigación. Uno de estos tiene que ver con el perfeccionamiento de la metodología propuesta en esta investigación como una primera aproximación al análisis del sistema de conocimiento científico (construcción de la cartografía y su medida de complejidad). Por otro lado, queda pendiente profundizar en el estudio de la relación entre las áreas de investigación científicas o las disciplinas, y los desarrollos de la investigación aplicada, los que podrían analizarse con los cruces de la base de datos de producción científica y las de CORFO INNOVA o FONDEF. En la misma línea se hace urgente estudiar la actual y real vinculación entre la investigación/conocimiento/disciplinas y el sector productivo nacional.

Parece interesante también analizar los aportes a la complementación del conocimiento que están realizando los Centros de Excelencia extranjeros de CORFO, los Institutos de Investigación Iniciativa Milenio, los fondos Basales y FONDAP de CONICYT entre otros.

Una tercera área de investigación que se desprende de las conclusiones de este estudio, es la real vinculación existente entre la academia y la industria. Si se revisara no sólo la investigación aplicada sino también los diversos aspectos que enlazan ambos mundos, se tendría un diagnóstico más cercano sobre las debilidades y fortalezas de este enlace, lo que podría iluminar sobre las condiciones, bajo las cuales, la academia en conjunto con la empresa puedan generar una dinámica virtuosa para la investigación científica y la innovación.

Referencias

- Adami, C. (2002) "What is complexity?" *BioEssays*, 24 (12): 1085–1094.
- Amaral, L., Scala, A., Barthélémy, M. y Stanley, H.E. (2000). "Classes of small-world networks". *PNAS*, (97)21: 11149–11152.
- Dong, J. y Horvath, S. (2007). "Understanding network concepts in modules". *BMC Syst Biol*, 1 (1): 24.
- Barabási, A.L. (2009). "Scale-Free Networks: A Decade and Beyond." *Science*, 325 (5939): 412-413.
- Barabási, A.L. y Albert, R. (1999). "Emergence of scaling in random networks." *Science*, 286: 509-512.
- Barabási, A.L, Albert, R. y Jeong, H. (2000). "Scale-free characteristics of random networks: the topology of the world-wide web". *Physica A*, 281: 69-77.
- Becher, T. (1994). "The significance of disciplinary differences." *Studies in Higher Education*, 19 (2): 151-161.
- Bettencourt, L.M, Kaiser, D. y Kaur, J. (2009). "Scientific discovery and topological transitions in collaboration networks". *Journal of Informetrics*, 3(3): 210-221.
- Bettencourt, L.M. y Kaur, J. (2011). "Evolution and structure of sustainability science". *PNAS*, 108(49): 19540-19545.
- Blondel, V. *et al.* (2008). "Fast unfolding of communities in large networks". *J. Stat. Mech.* P10008
- Börner, K., Chen, C. y Boyack, K. (2003) "Visualizing Knowledge Domains". en Blaise Cronin (Ed.), *Annual Review of Information Science & Technology*, Volume 37, Medford, NJ: Information Today, Inc./American Society for Information Science and Technology, chapter 5, pp. 179-255, 2003.
- Broekel, T. *et al.* (2014) "Modeling knowledge networks in economic geography: a discussion of four methods". *The Annals of Regional Science*, 53(2): 423-452.
- CEPAL. (2010). "Espacios iberoamericanos: vínculos entre universidades y empresas para el desarrollo tecnológico". M. Cimoli, Coordinador, División de Desarrollo Productivo y Empresarial de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Buchanan, M. (2007). "The Social Atom". Bloomsbury Publishing PLC: New York.
- Cárdenas, J.P., Olivares, G., Alfaro, R., Cabrera, F., Gibert, J., Goya, D., Palacios, A.G. (2014). "Redes complejas: un caso de estudio sobre la colaboración científica" En Bustos E., Márquez P. y Palacios A. *Las Rutas de la complejidad*. Ediciones Inst. de Sistemas Complejos de Valparaíso.

- Dahlman, C.J., Routti, J. y Ylä-Anttila, P. (2006). "Finland as a Knowledge Economy : Elements of Success and Lessons Learned". Washington, DC: World Bank.
- Fingerma, S. (2006). "Electronic Resources Reviews. Web of Science and Scopus: Current Features and Capabilities". *Issues in Science and Technology Librarianship*. Disponible en: <http://www.istl.org/O6-fall/electronic2.html>.
- Fullsack, M. (2011). "Complexity and its observer: does complexity increase in the course of evolution?" Paper presented at the 11th Congress of the Austrian Philosophical Society (OeGP), University of Vienna.
- Gaston, H. y Boschma, R. (2013). "The path-and place-dependent nature of scientific knowledge production in biotech 1986–2008." *Journal of Economic Geography*, lbs052.
- Gell-Mann, M. (1994). "The Quark and the Jaguar: adventures in the simple and the complex". W. H. Freeman, New York.
- Gu, S. y Lundvall, B.-A. (2006). "China's Innovation System and the Move towards Harmonious Growth and Endogenous Innovation, Innovation", *Management, Policy & Practice*, 8: 1-26.
- Giuliani, E y Arza, V. (2008). "What drives the formation of 'valuable' University-Industry linkages? An under-explored question in a hot policy debate", *SPRU Electronic Working Paper Series paper n° 170*.
- Hausmann, R., Hidalgo, C.A., Bustos, S., Coscia, M., Simoes, A. y Yildirim, M.A. (2014). "The Atlas of Economic Complexity". MIT Press.
- Hidalgo, C.A., Klinger, B., Barabasi, A.L. y Hausmann, R. (2007). "The Product Space Conditions the Development of Nations". *Science*, 317: 482-487
- Hidalgo, C.A. (2015). "Why Information Grows: The Evolution of Order, From Atoms to Economies". Basic Books, New York.
- Kauffman, S. (1995). "At home in the Universe. The Search for the Laws of Self-Organization and Complexity". Oxford University Press, New York.
- Klavans, R. y Boyack, K. (2009). "Toward a Consensus Map of Science". *J. Am. Soc. Inf. Sci.* 30: 455-476.
- Kobourov, S.G. (2012). "Spring Embedders and Force-Directed Graph Drawing Algorithms", [arXiv:1201.3011](https://arxiv.org/abs/1201.3011).
- Lambiotte, R. y Panzarasa P. (2009). "Communities, knowledge creation, and information diffusion". *Journal of Informetrics*, 3(3), 180-190.

- Lester, R. (2005). "Universities, Innovation, and the Competitiveness of Local Economies": summary report from the local innovation project — phase, MIT IPC Working Paper IPC-05-010, Cambridge MA.
- Lineweaver, C.H, Davies, P.C.W. y Ruse, M. (2013). "Complexity and the Arrow of Time". Cambridge University Press. England.
- Lotka, A. (1926). The frequency distribution of scientific productivity. *Journal of the Washington Academy of Sciences*, 16 (12): 317-324.
- Maturana, H. y Varela, F. (1973). "De máquinas y seres vivos. Una teoría sobre la organización biológica". Edit. Universitaria. Santiago de Chile.
- Merton, R.K. (1968). "The Matthew Effect in Science." *Science*, 159 (3810): 56-63.
- Montoya, J.M, Pimm, S.L. y Solé, R.V.. (2006). "Ecological networks and their fragility". *Nature*, Vol 442 (7100): 259-264.
- *Nature*. Special Issue (2014). Volumen 510 Número 7504: 187-306.
- Newman, M.E.J, Barabási, A.L. y Watts, D. (2006). "The Structure and Dynamics of Networks". Princeton University Press. New Jersey.
- Newman, M.E.J (2003) "The Structure and Functions of Complex Networks." *SIAM Review*, 45 (2): 167-256.
- Newman, M.E.J. (2004). "Who is the best connected scientist? A study of scientific coauthorship networks". *Complex Networks*. 337-370.
- Nicolis, G. y C. Rouvas-Nicolis. (2007). "Foundations of Complex Systems". *Nonlinear Dynamics, Statistical*.
- Niosi, J. (2000). "Canada's National Innovation System". McHill-Queen's University Press.
- OECD. (2007). "Reviews of Innovation Policy", New Zealand. OECD
- OECD. (2012). "OECD Science, Technology and Industry Outlook 2012", OECD
- Pentland, A. (2014). "Social Physics: How Good Ideas Spread-The Lessons from a New Science". The Penguin Press, New York.
- Price, D.J.S. (1965). "Networks of scientific papers." *Science*, 149: 510-515.
- Price, D.J.S. (1976). "A general theory of bibliometric and other cumulative advantage processes." *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 27: 292-306.

- Scimago Lab. (2014) "Principales indicadores cuantitativos de la actividad científica chilena 2012". Informe 2014: Una mirada a 10 años.
- Strogatz, S. (2001). "Exploring complex networks". *Nature*, 410: 268-276.
- Taleb, N.N. (2010). "The Black Swan. Random House". New York.
- UNESCO. (2010). "World Social Science Report 2010: Knowledge Divides". Primera edición por la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Cultura y la Ciencia.
- Watts, D.J. y Strogatz, S.H. (1998). "Collective dynamics of Small-World networks". *Nature*, 393: 440-442.

Anexo 1

DISCIPLINAS MÁS IMPORTANTES POR REGIÓN SEGÚN NÚMERO DE PUBLICACIONES E INVESTIGADORES

Disciplinas más importantes por región según N° de publicaciones (2008-2014)

REGIÓN	1ERA DISCIPLINA MÁS IMPORTANTE		2DA DISCIPLINA MÁS IMPORTANTE		3ERA DISCIPLINA MÁS IMPORTANTE	
I TARAPACÁ	Biología Marina	58	Pesca	31	Oceanografía	29
II ANTOFAGASTA	Astronomía y Astrofísica	208	Biología Marina	169	Ingeniería Química	106
III ATACAMA	Metalurgia y Ingeniería Metalúrgica	24	Probabilidad y estadística	15	Ciencia de Materiales Multidisciplina	14
IV COQUIMBO	Astronomía y Astrofísica	709	Biología Marina	385	Ecología	256
VALPARAÍSO	Astronomía y Astrofísica	602	Física, Partículas y Campos	475	Ingeniería Eléctrica y Electrónica	380
VI O'HIGGINS	Agricultura, Multidisciplinar	17	Agronomía	14	Sistema Cardiovascular y Cardíaco	10
VII MAULE	Botánica	157	Anatomía y Morfología	134	Agricultura Multidisciplinar	132
VIII BÍO BÍO	Biología Marina	610	Oceanografía	610	Astronomía y Astrofísica	579
IX ARAUCANÍA	Anatomía y Morfología	535	Ciencia del Suelo	210	Medicine General e Interna	164
X LOS LAGOS	Biología Marina	295	Pesca	152	Oceanografía	114
XI AYSÉN	Oceanografía	57	Biología Marina	54	Ecology	46
XII MAGALLANES	Ecología	117	Conservación de Biodiversidad	84	Biología Marina	83
XIII METROPOLITANA	Astronomía y Astrofísica	3498	Medicine, general e Interna	2978	Bioquímica y Biología Molecular	1756
XIV LOS RÍOS	Ciencias Veterinarias	373	Ecología	361	Biología Marina	301
XV ARICA Y PARINACOTA	Antropología	122	Arqueología	68	Ecología	60

Fuente: elaboración propia a partir de datos WOS

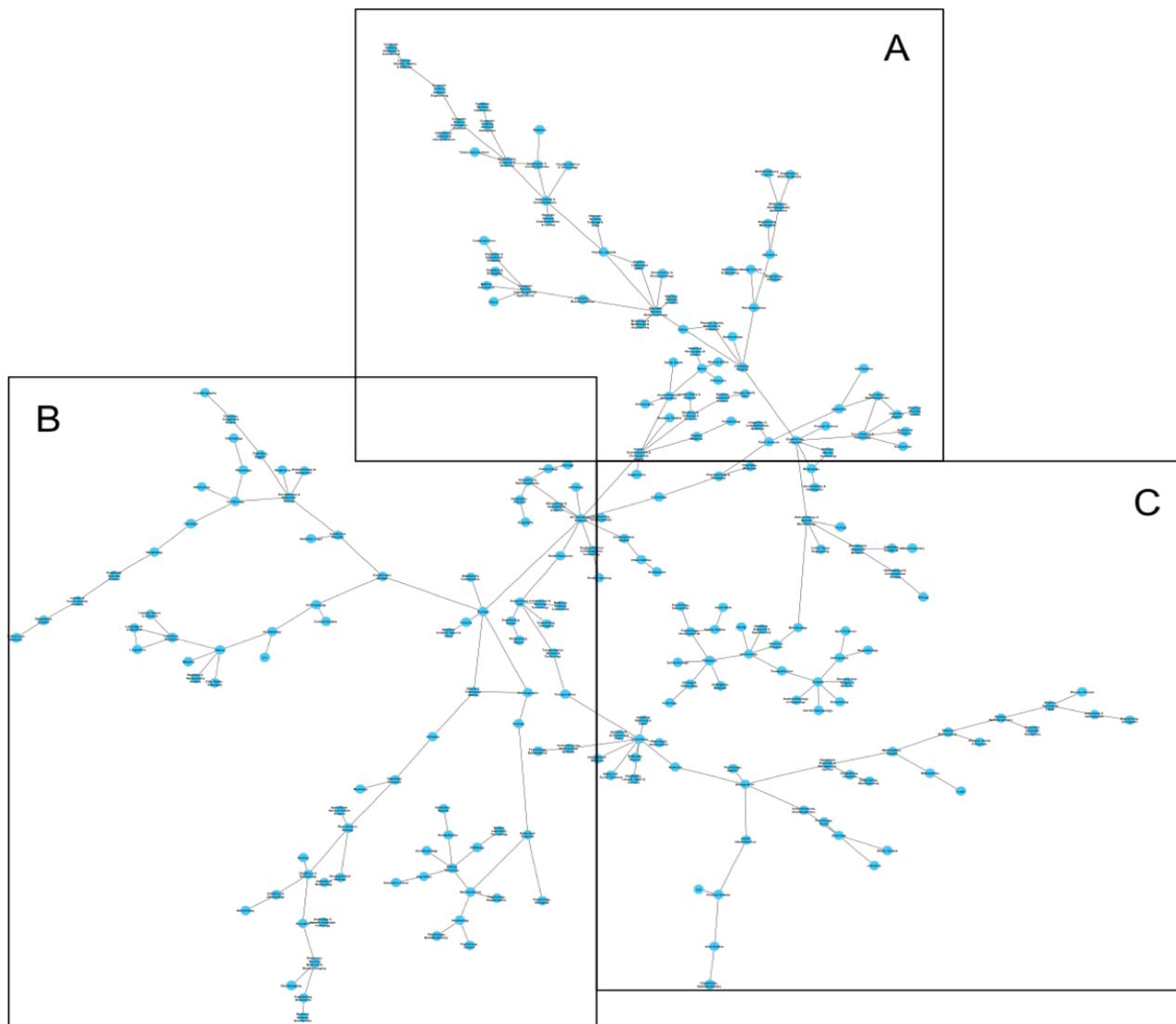
Disciplinas más importantes por región por número de Investigadores (2008-2014)

REGIÓN	1ERA DISCIPLINA		2DA DISCIPLINA		3ERA DISCIPLINA	
I TARAPACÁ	Biología Marina	54	Oceanografía	30	Química Multidisciplinar	25
II ANTOFAGASTA	Biología Marina	307	Oceanografía	157	Pesca	156
ATACAMA	Metalurgia y Ingeniería Metalúrgica	14	Minería y Procesos Mineros	9	Probabilidad Y Estadística	8
IV COQUIMBO	Astronomía y Astrofísica	494	Optica	137	Ecología	84
V VALPARAÍSO	Ingeniería Eléctrica y Electrónica	328	Biotecnología y Microbiología	317	Biología Marina	294
VI O'HIGGINS	Horticultura	15	Genética y Herencia	9	Forestal	7
VII MAULE	Botánica	159	Agricultura Multidisciplinar	149	Agronomía	119
VIII BÍO BÍO	Biología Marina	448	Oceanografía	446	Ecología	403
IX ARAUCANÍA	Astronomía y Astrofísica	326	Medicine, general e Interna	176	Ciencia del Suelo	175
X LOS LAGOS	Biología Marina	141	Pesca	80	Oceanografía/Ecología	53
XI AYSÉN	Oceanografía	26	Biología Marina	23	Conservación de la Biodiversidad	12
XII MAGALLANES	Ecology	78	Conservación de la Biodiversidad	58	Biología Marina	54
XIII METROPOLITANA	Medicine, General e Interna	3152	Cirugía	2111	Bioquímica y Biología Molecular	1930
XIV LOS RÍOS	Ciencias Veterinarias	386	Biología Marina	332	Ecología	318
XV ARAUCANÍA Y PARINACOTA	Antropología	67	Arqueología	51	Anatomía Y Morfología	26

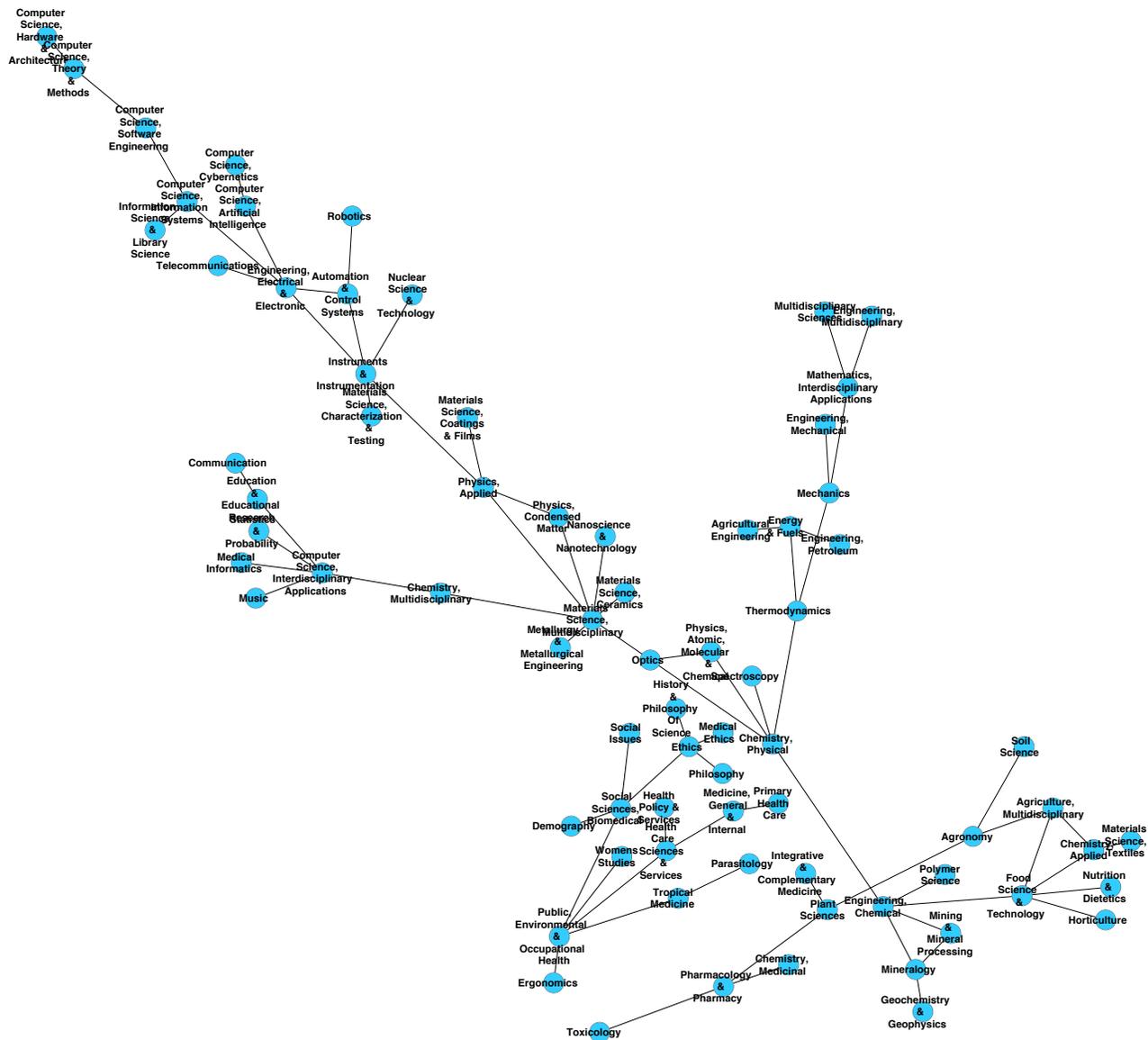
Anexo 2

CARTOGRAFÍA DEL CONOCIMIENTO CHILENO

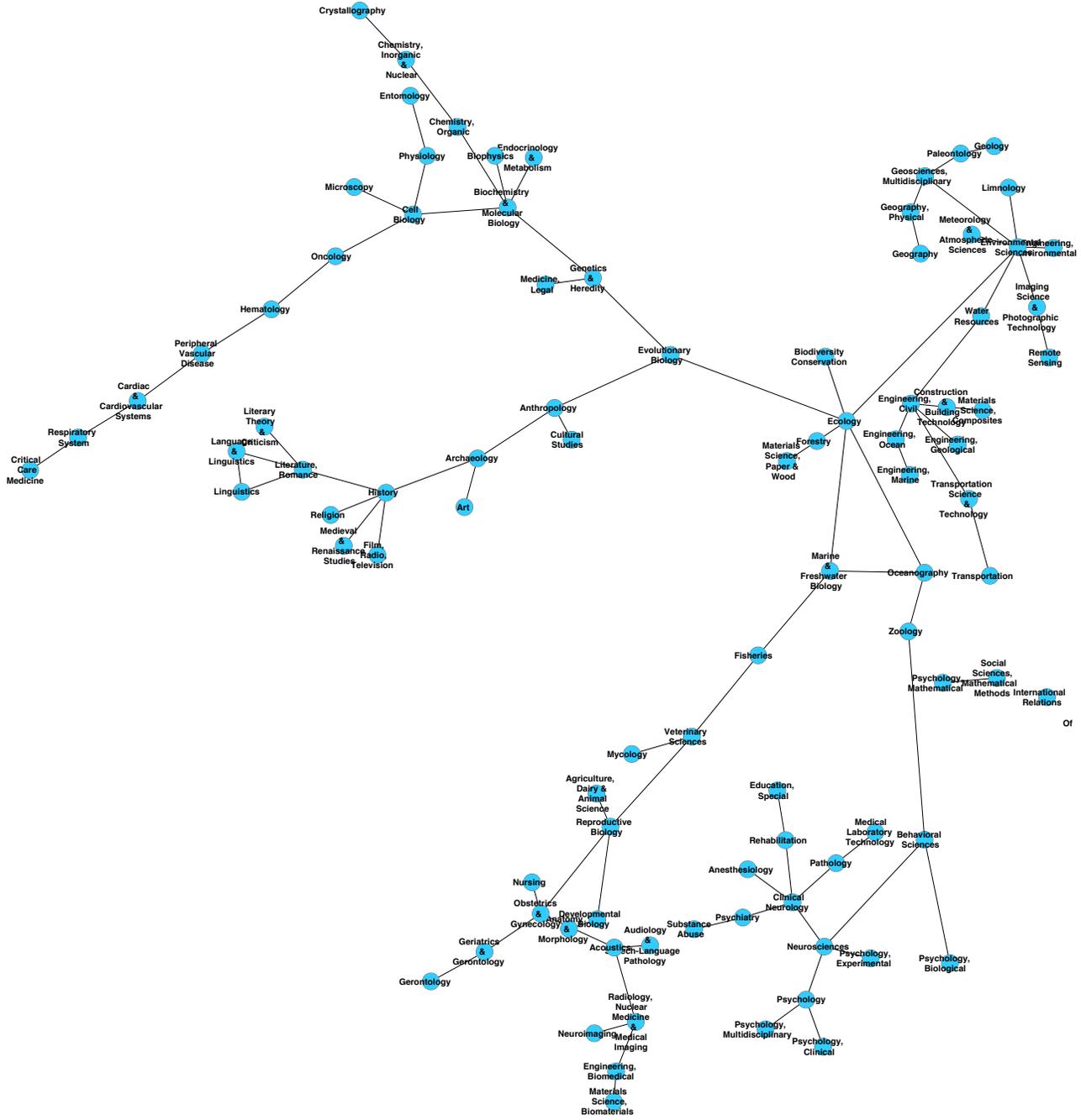
Detalle



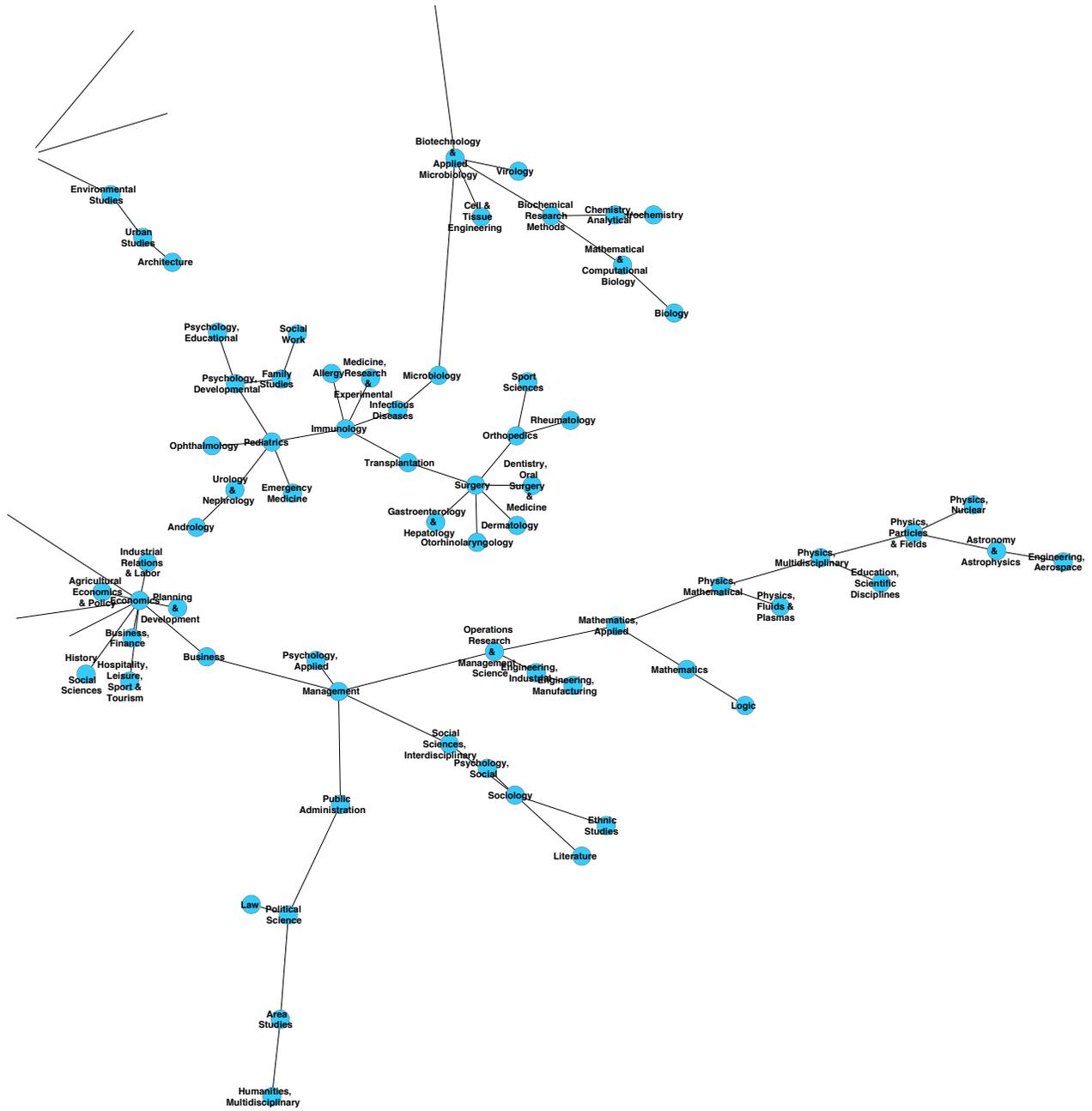
A.



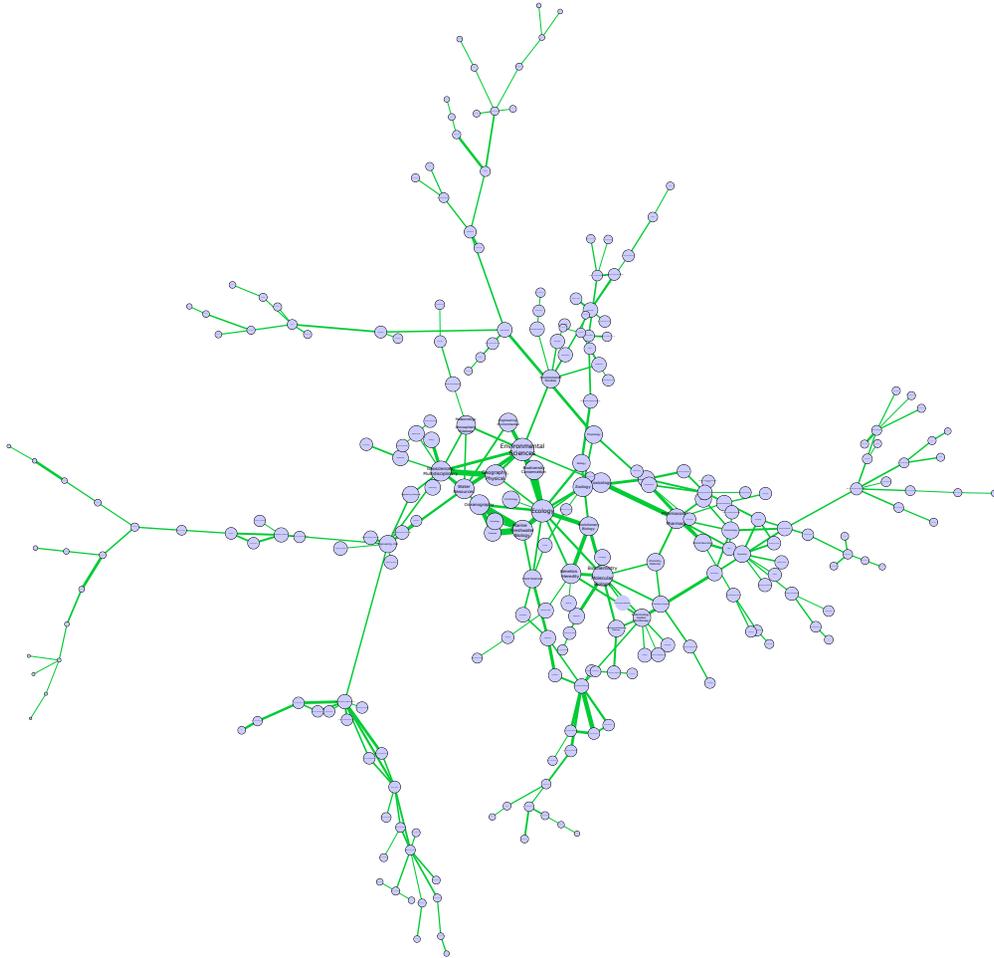
B.



C.

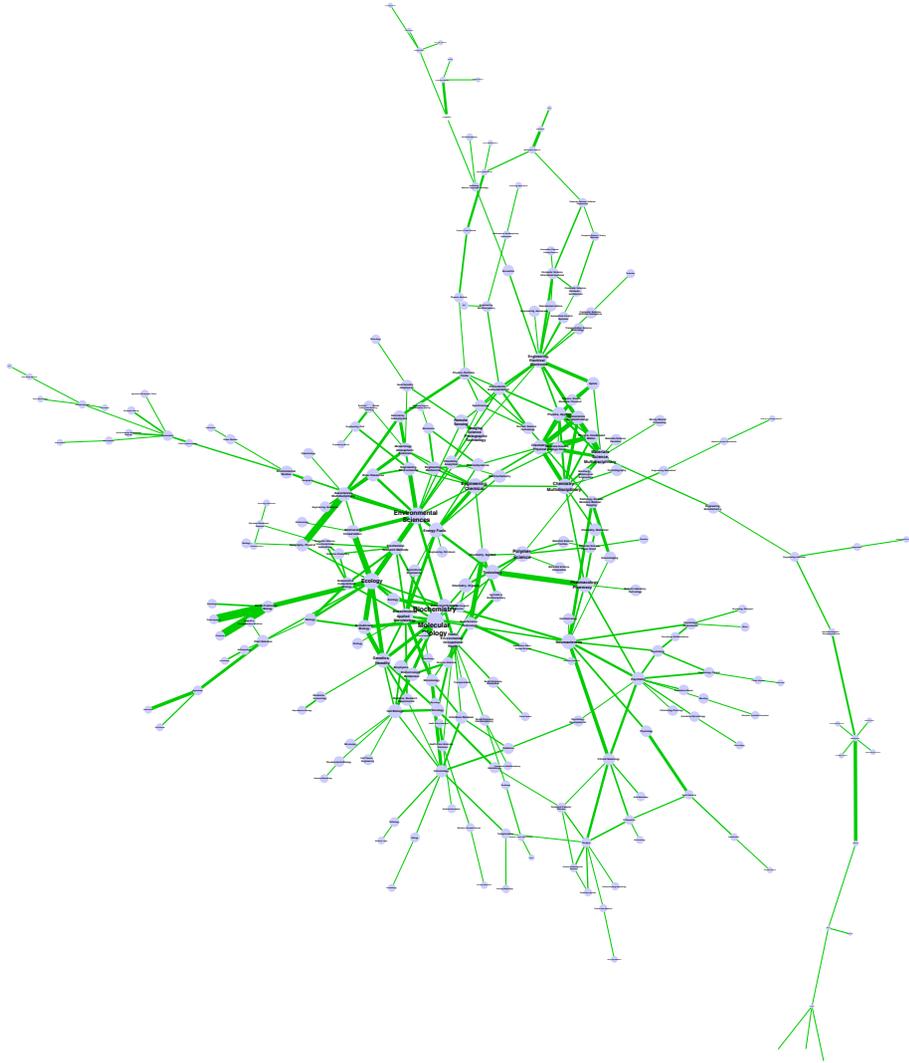


CARTOGRAFÍA DEL CONOCIMIENTO DE NUEVA ZELANDA



Tamaño y etiqueta de los nodos en función de la centralidad. Grosor de los enlaces en función de la relación c.

CARTOGRAFÍA DEL CONOCIMIENTO DE FINLANDIA



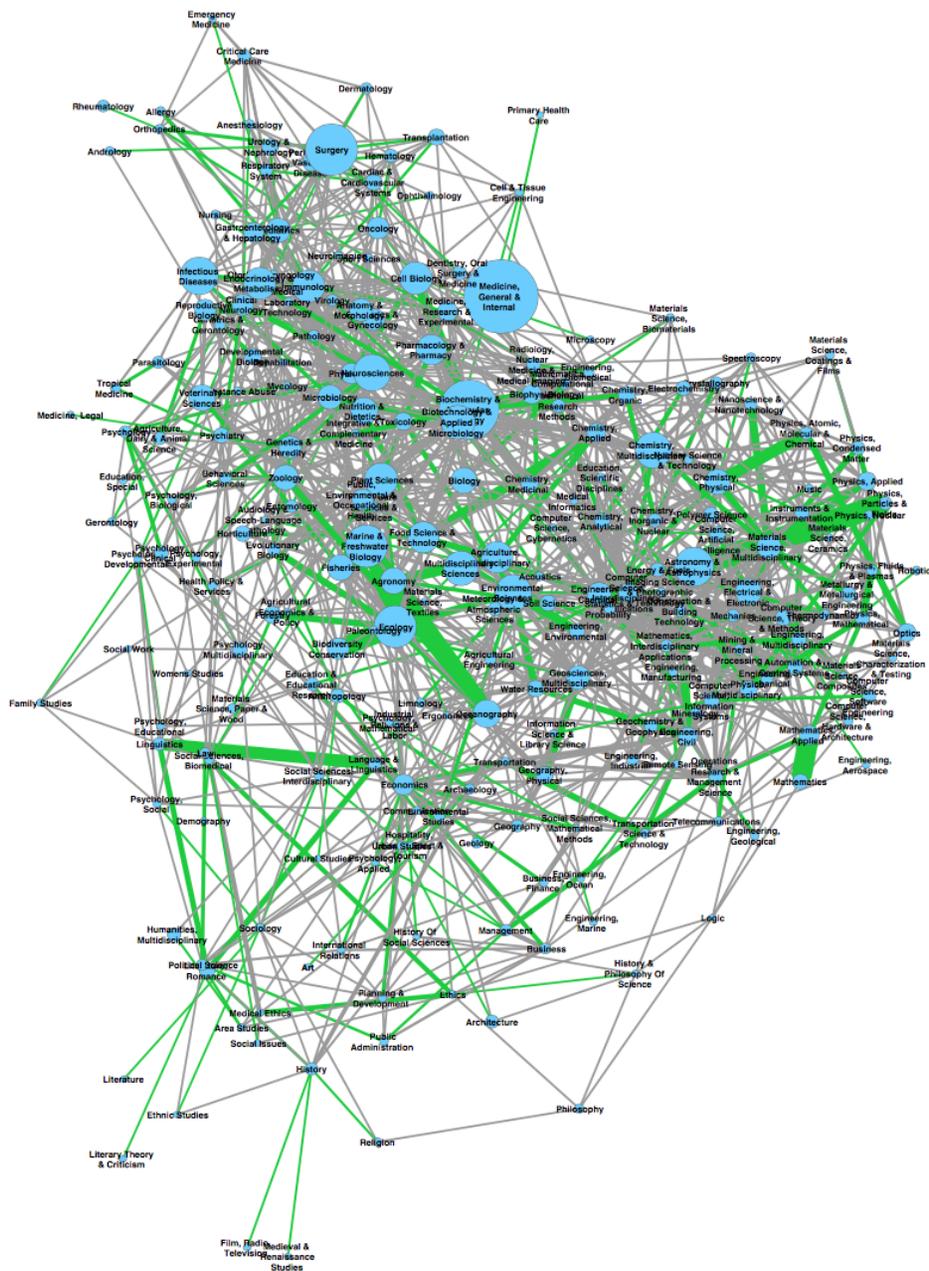
Tamaño y etiqueta de los nodos en función de la centralidad. Grosor de los enlaces en función de la relación c.

Anexo 3

ALGORITMO ENLACES POTENCIALES:

PASO 1: Superponer sobre la red G de complemento disciplinar, la cartografía de conocimiento chileno G'.

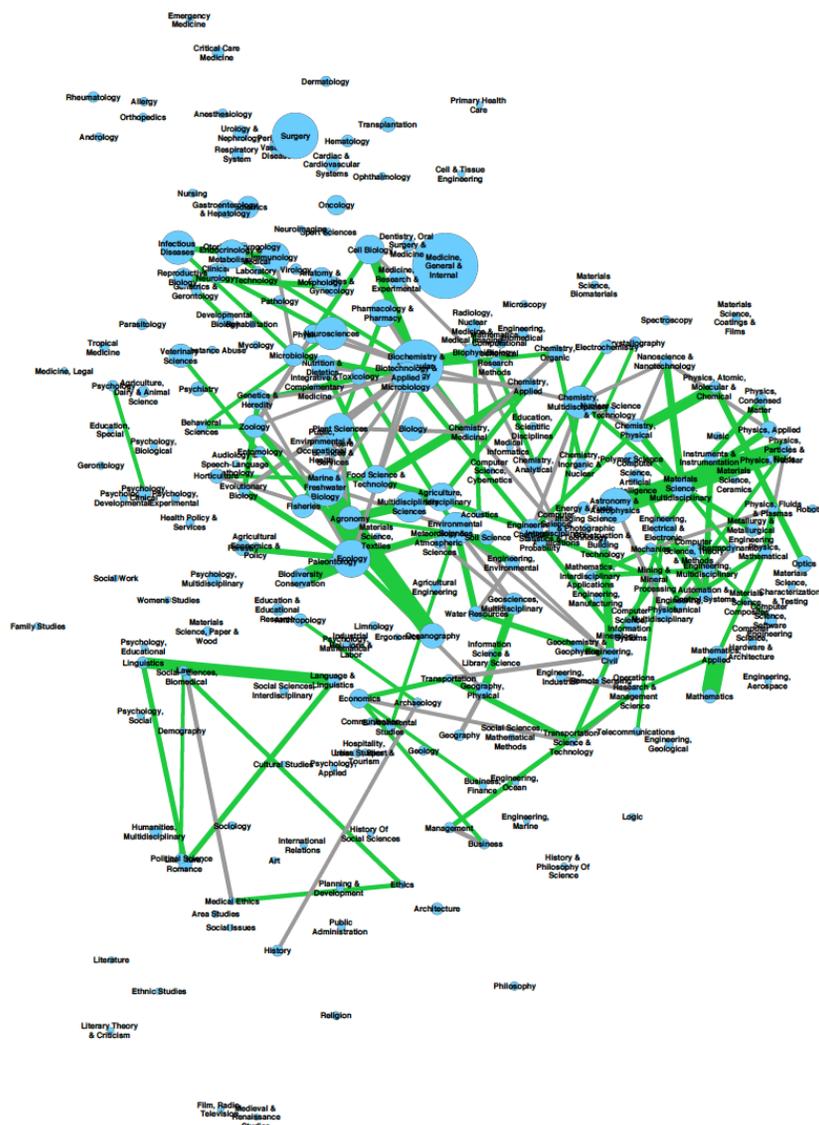
Grafo G(236,1400) para el complemento disciplinar en la ciencia chilena periodo 2008-2014



Enlaces verdes representan aquellos considerados en la cartografía del conocimiento G'(236,241).

PASO 2: Eliminar todas aquellas relaciones que tengan una frecuencia de relación c menor al promedio. Con este procedimiento se parte del supuesto que aquellos vínculos entre disciplinas científicas de baja frecuencia obedecen a relaciones que no han superado cierto umbral de complementariedad que podría ser entendido como un alto costo asociado al complemento.

Grafo para el complemento disciplinar en la ciencia chilena



Enlaces verdes representan aquellos considerados en la cartografía del conocimiento. Fueron eliminados los enlaces con frecuencia c menor al promedio.

Paso 3: Eliminar todas aquellas disciplinas, y enlaces asociados, con una Masa Crítica menor a un umbral arbitrario (menor a la media). Este paso descarta de los vínculos potenciales aquellos compuestos por disciplinas con baja potencialidad para desarrollarlos.

LOS PARÁMETROS UTILIZADOS POR EL GA FUERON: POBLACIÓN INICIAL=100, NÚMERO DE ITERACIONES= 500, PROBABILIDAD DE CRUZA $P=0.9$ Y PROBABILIDAD DE MUTACIÓN $PM=0.3$.

Paso 4: Considerar como enlaces potenciales sólo aquellos que pertenecen a la componente conectada mayor. Este paso descarta de los vínculos potenciales aquellos relacionados a disciplinas muy periféricas en la cartografía del conocimiento dándole una potencialidad mayor aquellos cercanos a disciplinas con mayor centralidad en esta.

Anexo 4

ALGORITMO GA:

Paso 1: A partir de todas las relaciones entre disciplinas encontradas entre el período 2004-2014 (grafo G), obtener una lista de enlaces cuya frecuencia de relación sea superior a la media de relaciones en el período. Esta lista, que no incluye aquellos enlaces que forman parte de la cartografía para Chile definida en los capítulos anteriores, se utilizó como fuente de enlaces para generar los individuos participantes en el proceso. La razón de escoger dentro de un conjunto limitado de enlaces es disminuir el número de configuraciones (individuos) posibles a evaluar por el GA descartando configuraciones compuestas por vínculos débiles donde el complemento disciplinar parece más costoso para Chile.

Paso 2: Generar los individuos (cromosomas), añadiendo a la cartografía del conocimiento (G'), m enlaces al azar de la lista obtenida en el Paso 1. La razón para añadir m enlaces fijos es asumiendo un escenario en el cual la disponibilidad de recursos es limitada para la implementación de una complejidad inducida.

Paso 3: Para cada individuo ($G' + m$ enlaces), calcular su Heterogeneidad de conectividad, su coeficiente de *clustering* medio, su diámetro y el promedio de la frecuencia de sus enlaces.

Paso 4: Calcular para cada individuo su Sofisticación (función *fitness* corresponde a la ecuación 1 (Capítulo 2)).

Paso 5: Elegir como padres con mayor probabilidad aquellos individuos con más alto *fitness*.

Paso 6: Los padres se cruzan con probabilidad (p) para dar origen a dos hijos. La cruce sólo afecta los m enlaces. Para este caso se utilizó el tipo de cruce multipunto, que consiste en escoger al azar dos puntos de cruce (posición de un enlace) de cada padre donde cada hijo recibe los genes de sus padres.

Paso 7: Los descendientes pasan a formar la nueva generación. Si los padres no se cruzan en el Paso 6, pueden mutar con una probabilidad (pm) y pasar a la siguiente generación, sólo mutando los m enlaces. Para este caso se utilizó la mutación simple que significa añadir o quitar un enlace de forma aleatoria dentro de su cromosoma.

Paso 8: Repetir el proceso desde el paso 4 en adelante.

La razón para utilizar la probabilidad de cruce p es dar posibilidades de mantenerse a “buenos” genes de los padres y no perderse por cruce. Por su parte la mutación de los padres no cruzados permite explorar el espacio matemático de posibilidades disminuyendo la probabilidad de que el algoritmo quede atrapado en un óptimo local.

Anexo 5

Taxonomía de disciplinas. Disciplinas WoS utilizadas en el estudio y clasificación según OECD en dos niveles.

OCDE-NIVEL SUPERIOR	OCDE-NIVEL MEDIO	WOS-DISCIPLINE
AGRICULTURAL SCIENCES	Agriculture, forestry, fisheries	AGRICULTURE, MULTIDISCIPLINARY
AGRICULTURAL SCIENCES	Agriculture, forestry, fisheries	AGRONOMY
AGRICULTURAL SCIENCES	Agriculture, forestry, fisheries	FISHERIES
AGRICULTURAL SCIENCES	Agriculture, forestry, fisheries	FORESTRY
AGRICULTURAL SCIENCES	Agriculture, forestry, fisheries	HORTICULTURE
AGRICULTURAL SCIENCES	Agriculture, forestry, fisheries	SOIL SCIENCE
AGRICULTURAL SCIENCES	Animal and dairy science	AGRICULTURE, DAIRY & ANIMAL SCIENCE
AGRICULTURAL SCIENCES	Veterinary science	VETERINARY SCIENCE
AGRICULTURAL SCIENCES	Other agricultural science	AGRICULTURAL ENGINEERING
AGRICULTURAL SCIENCES	Other agricultural science	AGRICULTURAL ECONOMICS & POLICY
AGRICULTURAL SCIENCES	Other agricultural science	FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

OCDE-NIVEL SUPERIOR	OCDE-NIVEL MEDIO	WOS-DISCIPLINE
SOCIAL SCIENCE	Psychology	PSYCHOLOGY, BIOLOGICAL
SOCIAL SCIENCE	Psychology	BEHAVIORAL SCIENCES
SOCIAL SCIENCE	Psychology	PSYCHOLOGY, EDUCATIONAL
SOCIAL SCIENCE	Psychology	ERGONOMICS
SOCIAL SCIENCE	Psychology	PSYCHOLOGY, DEVELOPMENTAL
SOCIAL SCIENCE	Psychology	PSYCHOLOGY, APPLIED
SOCIAL SCIENCE	Psychology	PSYCHOLOGY
SOCIAL SCIENCE	Psychology	PSYCHOLOGY, MULTIDISCIPLINARY
SOCIAL SCIENCE	Psychology	PSYCHOLOGY, MATHEMATICAL
SOCIAL SCIENCE	Psychology	PSYCHOLOGY, EXPERIMENTAL
SOCIAL SCIENCE	Psychology	PSYCHOLOGY, SOCIAL
SOCIAL SCIENCE	Economics and business	BUSINESS
SOCIAL SCIENCE	Economics and business	BUSINESS, FINANCE
SOCIAL SCIENCE	Economics and business	ECONOMICS
SOCIAL SCIENCE	Economics and business	INDUSTRIAL RELATIONS & LABOR
SOCIAL SCIENCE	Economics and business	MANAGEMENT
SOCIAL SCIENCE	Economics and business	OPERATIONS RESEARCH & MANAGEMENT SCIENCE
SOCIAL SCIENCE	Educational sciences	EDUCATION & EDUCATIONAL RESEARCH
SOCIAL SCIENCE	Educational sciences	EDUCATION, SCIENTIFIC DISCIPLINES
SOCIAL SCIENCE	Educational sciences	EDUCATION, SPECIAL

Serie Estudios

SOCIAL SCIENCE	Sociology	DEMOGRAPHY
SOCIAL SCIENCE	Sociology	ANTHROPOLOGY
SOCIAL SCIENCE	Sociology	ETHNIC STUDIES
SOCIAL SCIENCE	Sociology	FAMILY STUDIES
SOCIAL SCIENCE	Sociology	SOCIAL SCIENCES, MATHEMATICAL METHODS
SOCIAL SCIENCE	Sociology	SOCIAL ISSUES
SOCIAL SCIENCE	Sociology	SOCIAL WORK
SOCIAL SCIENCE	Sociology	SOCIOLOGY
SOCIAL SCIENCE	Sociology	WOMEN'S STUDIES
SOCIAL SCIENCE	Law	CRIMINOLOGY & PENOLOGY
SOCIAL SCIENCE	Law	LAW
SOCIAL SCIENCE	Political science	INTERNATIONAL RELATIONS
SOCIAL SCIENCE	Political science	POLITICAL SCIENCE
SOCIAL SCIENCE	Political science	PUBLIC ADMINISTRATION
SOCIAL SCIENCE	Social and economic geography	AREA STUDIES
SOCIAL SCIENCE	Social and economic geography	ENVIROMENTAL STUDIES
SOCIAL SCIENCE	Social and economic geography	GEOGRAPHY
SOCIAL SCIENCE	Social and economic geography	PLANNING & DEVELOPMENT
SOCIAL SCIENCE	Social and economic geography	TRANSPORTATION
SOCIAL SCIENCE	Social and economic geography	URBAN STUDIES
SOCIAL SCIENCE	Media and communication	COMMUNICATION
SOCIAL SCIENCE	Media and communication	INFORMATION SCIENCE & LIBRARY SCIENCE
SOCIAL SCIENCE	Other social sciences	HOSPITALITY, LEISURE, SPORT & TOURISM
SOCIAL SCIENCE	Other social sciences	ASIAN STUDIES
SOCIAL SCIENCE	Other social sciences	CULTURAL STUDIES
SOCIAL SCIENCE	Other social sciences	SOCIAL SCIENCES, INTERDISCIPLINARY

OCDE-NIVEL SUPERIOR	OCDE-NIVEL MEDIO	WOS-DISCIPLINE
HUMANITIES	History and archaeology	ARCHAEOLOGY
HUMANITIES	History and archaeology	HISTORY
HUMANITIES	History and archaeology	HISTORY & PHILOSOPHY OF SCIENCE
HUMANITIES	History and archaeology	HISTORY OF SOCIAL SCIENCES
HUMANITIES	History and archaeology	MEDIEVAL & RENAISSANCE STUDIES
HUMANITIES	Languajes and literature	CLASSICS
HUMANITIES	Languajes and literature	FOLKLORE
HUMANITIES	Languajes and literature	LINGUISTICS
HUMANITIES	Languajes and literature	LITERARY THEORY & CRITICISM
HUMANITIES	Languajes and literature	LANGUAGE & LINGUISTICS
HUMANITIES	Languajes and literature	LITERARY REVIEWS
HUMANITIES	Languajes and literature	LITERATURE
HUMANITIES	Languajes and literature	LITERATURE, AFRICAN, AUSTRALIAN, CANADIAN
HUMANITIES	Languajes and literature	LITERATURE, AMERICAN
HUMANITIES	Languajes and literature	LITERATURE, BRITISH ISLES
HUMANITIES	Languajes and literature	LITERATURE, GERMAN, DUTCH, SCANDINAVIAN

Serie Estudios

HUMANITIES	Languajes and literature	LITERATURE, ROMANCE
HUMANITIES	Languajes and literature	LITERATURE, SLAVIC
HUMANITIES	Languajes and literature	POETRY
HUMANITIES	Philosophy, ethics and religion	ETHICS
HUMANITIES	Philosophy, ethics and religion	PHILOSOPHY
HUMANITIES	Philosophy, ethics and religion	RELIGION
HUMANITIES	Art	ARCHITECTURE
HUMANITIES	Art	ART
HUMANITIES	Art	DANCE
HUMANITIES	Art	FILM, RADIO, TELEVISION
HUMANITIES	Art	MUSIC
HUMANITIES	Art	THEATER
HUMANITIES	Other Humanities	HUMANITIES, MULTIDISCIPLINARY

OCDE-NIVEL SUPERIOR	OCDE-NIVEL MEDIO	WOS-DISCIPLINE
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Basic medical research	ANATOMY & MORPHOLOGY
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Basic medical research	CHEMISTRY, MEDICINAL
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Basic medical research	PSYCHOLOGY, CLINICAL
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Basic medical research	IMMUNOLOGY
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Basic medical research	MEDICINE, RESEARCH & EXPERIMENTAL
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Basic medical research	NEUROSCIENCES
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Basic medical research	PATHOLOGY
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Basic medical research	PHARMACOLOGY & PHARMACY
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Basic medical research	PHYSIOLOGY
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Basic medical research	TOXICOLOGY
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	ALLERGY
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	ANDROLOGY
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	ANESTHESIOLOGY
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	ONCOLOGY
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	CARDIAC & CARDIOVASCULAR SYSTEMS
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	CRITICAL CARE MEDICINE
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	EMERGENCY MEDICINE
MEDICALAND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	DENTISTRY, ORAL SURGERY & MEDICINE

Serie Estudios

MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	DERMATOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	ENDOCRINOLOGY & METABOLISM
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	GASTROENTEROLOGY & HEPATOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	GERIATRICS & GERONTOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	GERONTOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	HEMATOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	INTEGRATIVE & COMPLEMENTARY MEDICINE
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	MEDICINE, GENERAL & INTERNAL
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	CLINICAL NEUROLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	NEUROIMAGING
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	OBSTETRICS & GYNECOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	OPHTHALMOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	ORTHOPEDICS
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	OTORHINOLARYNGOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	PEDIATRICS
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	PSYCHIATRY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	RADIOLOGY, NUCLEAR MEDICINE & MEDICAL IMAGING
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	RESPIRATORY SYSTEM
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	RHEUMATOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	SURGERY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	TRANSPLANTATION
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	UROLOGY & NEPHROLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	PERIPHERAL VASCULAR DISEASE
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Clinical medicine	AUDIOLOGY & SPEECH-LANGUAGE PATHOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	SUBSTANCE ABUSE
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	HEALTH CARE SCIENCES & SERVICES
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	HEALTH POLICY & SERVICES
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	PUBLIC, ENVIRONMENTAL & OCCUPATIONAL HEALTH

Serie Estudios

MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	INFECTIOUS DISEASES
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	MEDICAL ETHICS
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	MEDICINE, LEGAL
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	MEDICAL INFORMATICS
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	NURSING
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	NUTRITION & DIETETICS
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	PARASITOLOGY
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	PSYCHOLOGY, PSYCHOANALYSIS
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	REHABILITATION
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	SOCIAL SCIENCES, BIOMEDICAL
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	SPORT SCIENCES
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	TROPICAL MEDICINE
MEDICAL AND HEALTH SCIENCES	Health sciences	PRIMARY HEALTH CARE

OCDE-NIVEL SUPERIOR	OCDE-NIVEL MEDIO	WOS-DISCIPLINE
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Civil engineering	CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Civil engineering	ENGINEERING, CIVIL
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Civil engineering	TRANSPORTATION SCIENCE & TECHNOLOGY
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Electrical eng, electronic eng	AUTOMATION & CONTROL SYSTEMS
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Electrical eng, electronic eng	COMPUTER SCIENCE, HARDWARE & ARCHITECTURE
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Electrical eng, electronic eng	ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Electrical eng, electronic eng	ROBOTICS
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Electrical eng, electronic eng	TELECOMMUNICATIONS
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Mechanical engineering	ENGINEERING, AEROSPACE
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Mechanical engineering	THERMODYNAMICS
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Mechanical engineering	ENGINEERING, MECHANICAL
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Mechanical engineering	MECHANICS
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Mechanical engineering	NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY

Serie Estudios

ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Chemical engineering	ENGINEERING, CHEMICAL
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Materials engineering	MATERIALS SCIENCE, PAPER & WOOD
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Materials engineering	MATERIALS SCIENCE, CERAMICS
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Materials engineering	MATERIALS SCIENCE, MULTIDISCIPLINARY
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Materials engineering	METALLURGY & METALLURGICAL ENGINEERING
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Materials engineering	MATERIALS SCIENCE, CHARACTERIZATION & TESTING
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Materials engineering	MATERIALS SCIENCE, COATINGS & FILMS
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Materials engineering	MATERIALS SCIENCE, COMPOSITES
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Materials engineering	MATERIALS SCIENCE, TEXTILES
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Medical Engineering	ENGINEERING, BIOMEDICAL
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Medical Engineering	MEDICAL LABORATORY TECHNOLOGY
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Medical Engineering	CELL & TISSUE ENGINEERING
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Environmental engineering	ENERGY & FUELS
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Environmental engineering	ENGINEERING, ENVIRONMENTAL
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Environmental engineering	ENGINEERING, MARINE
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Environmental engineering	ENGINEERING, OCEAN
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Environmental engineering	ENGINEERING, PETROLEUM
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Environmental engineering	ENGINEERING, GEOLOGICAL
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Environmental engineering	REMOTE SENSING
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Environmental engineering	MINING & MINERAL PROCESSING
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Environmental biotechnology	BIOTECHNOLOGY & APPLIED MICROBIOLOGY
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Industrial biotechnology	MATERIALS SCIENCE, BIOMATERIAL
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Nano-technology	NANOSCIENCE & NANOTECHNOLOGY
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Other engineering and technologies	ENGINEERING, MULTIDISCIPLINARY
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Other engineering and technologies	ENGINEERING, INDUSTRIAL
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Other engineering and technologies	ENGINEERING, MANUFACTURING
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Other engineering and technologies	FOOD SCIENCE & TECHNOLOGY

Serie Estudios

ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Other engineering and technologies	INSTRUMENTS & INSTRUMENTATION
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Other engineering and technologies	MICROSCOPY
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Other engineering and technologies	IMAGING SCIENCE & PHOTOGRAPHIC TECHNOLOGY
ENGINEERING AND TECHNOLOGY	Other engineering and technologies	SPECTROSCOPY

OCDE-NIVEL SUPERIOR	OCDE-NIVEL MEDIO	WOS-DISCIPLINE
NATURAL SCIENCES	Mathematics	MATHEMATICS, APPLIED
NATURAL SCIENCES	Mathematics	MATHEMATICS, INTERDISCIPLINARY APPLICATIONS
NATURAL SCIENCES	Mathematics	MATHEMATICS
NATURAL SCIENCES	Mathematics	PHYSICS, MATHEMATICAL
NATURAL SCIENCES	Mathematics	LOGIC
NATURAL SCIENCES	Mathematics	STATISTICS & PROBABILITY
NATURAL SCIENCES	Computer and information sciences	LOGIC
NATURAL SCIENCES	Computer and information sciences	COMPUTER SCIENCE, ARTIFICIAL INTELLIGENCE
NATURAL SCIENCES	Computer and information sciences	COMPUTER SCIENCE, CYBERNETICS
NATURAL SCIENCES	Computer and information sciences	COMPUTER SCIENCE, INFORMATION SYSTEMS
NATURAL SCIENCES	Computer and information sciences	COMPUTER SCIENCE, INTERDISCIPLINARY APPLICATIONS
NATURAL SCIENCES	Computer and information sciences	COMPUTER SCIENCE, SOFTWARE ENGINEERING
NATURAL SCIENCES	Computer and information sciences	COMPUTER SCIENCE, THEORY & METHODS
NATURAL SCIENCES	Physical sciences and astronomy	ACOUSTICS
NATURAL SCIENCES	Physical sciences and astronomy	ASTRONOMY & ASTROPHYSICS
NATURAL SCIENCES	Physical sciences and astronomy	OPTICS
NATURAL SCIENCES	Physical sciences and astronomy	PHYSICS, APPLIED
NATURAL SCIENCES	Physical sciences and astronomy	PHYSICS, FLUIDS & PLASMAS
NATURAL SCIENCES	Physical sciences and astronomy	PHYSICS, ATOMIC, MOLECULAR & CHEMICAL
NATURAL SCIENCES	Physical sciences and astronomy	PHYSICS, MULTIDISCIPLINARY
NATURAL SCIENCES	Physical sciences and astronomy	PHYSICS, CONDENSED MATTER
NATURAL SCIENCES	Physical sciences and astronomy	PHYSICS, NUCLEAR
NATURAL SCIENCES	Physical sciences and astronomy	PHYSICS, PARTICLES & FIELDS
NATURAL SCIENCES	Chemical sciences	CHEMISTRY, APPLIED
NATURAL SCIENCES	Chemical sciences	CHEMISTRY, MULTIDISCIPLINARY
NATURAL SCIENCES	Chemical sciences	CHEMISTRY, ANALYTICAL
NATURAL SCIENCES	Chemical sciences	CHEMISTRY, INORGANIC & NUCLEAR
NATURAL SCIENCES	Chemical sciences	CHEMISTRY, ORGANIC
NATURAL SCIENCES	Chemical sciences	CHEMISTRY, PHYSICAL
NATURAL SCIENCES	Chemical sciences	CRISTALLOGRAPHY
NATURAL SCIENCES	Chemical sciences	ELECTROCHEMISTRY
NATURAL SCIENCES	Chemical sciences	POLYMER SCIENCE
NATURAL SCIENCES	Earth and related environmental sciences	GEOCHEMISTRY & GEOPHYSICS
NATURAL SCIENCES	Earth and related environmental sciences	ENVIRONMENTAL SCIENCES

Serie Estudios

NATURAL SCIENCES	Earth and related environmental sciences	GEOGRAPHY, PHYSICAL
NATURAL SCIENCES	Earth and related environmental sciences	GEOLOGY
NATURAL SCIENCES	Earth and related environmental sciences	GEOSCIENCES, MULTIDISCIPLINARY
NATURAL SCIENCES	Earth and related environmental sciences	METEOROLOGY & ATMOSPHERIC SCIENCES
NATURAL SCIENCES	Earth and related environmental sciences	MINERALOGY
NATURAL SCIENCES	Earth and related environmental sciences	OCEANOGRAPHY
NATURAL SCIENCES	Earth and related environmental sciences	PALEONTOLOGY
NATURAL SCIENCES	Earth and related environmental sciences	WATER RESOURCES
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	BIODIVERSITY CONSERVATION
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	BIOCHEMICAL RESEARCH METHODS
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	BIOCHEMISTRY & MOLECULAR BIOLOGY+
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	BIOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	BIOPHYSICS
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	PLANT SCIENCES
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	CELL BIOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	ECOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	EVOLUTIONARY BIOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	DEVELOPMENTAL BIOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	ENTOMOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	GENETICS & HEREDITY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	MATHEMATICAL & COMPUTATIONAL BIOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	LIMNOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	MARINE & FRESHWATER BIOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	MICROBIOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	MYCOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	ORNITHOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	REPRODUCTIVE BIOLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	VIROLOGY
NATURAL SCIENCES	Biological sciences	ZOOLOGY
NATURAL SCIENCES	Other natural sciences	MULTIDISCIPLINARY SCIENCES

Este documento fue editado, diseñado y corregido por el equipo de la Secretaría Ejecutiva del Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo.

Santiago de Chile, septiembre de 2015

cnid | Consejo Nacional
de Innovación
para el Desarrollo

