

# **GEOMÁTICA APLICADA**

**Carlos Mena Frau  
Yony Ormazábal Rojas  
Viviana Barrientos Lardinois**

*Editores*

## 1.1. Información a partir de imágenes: Visión científica y agenda de investigación del ISPRS

Jun Chen<sup>a</sup>, Ian Dowman<sup>b</sup>, Songnian Li<sup>c</sup>, Zhilin Li<sup>d</sup>, Marguerite Madden<sup>e</sup>, Jon Mills<sup>f</sup>, Nicolas Paparoditis<sup>g</sup>, Franz Rottensteiner<sup>h</sup>, Monika Sester<sup>i</sup>, Charles Toth<sup>j</sup>, John Trinder<sup>k</sup>, Christian Heipke<sup>h</sup>

<sup>a</sup>National Geomatics Center of China, Beijing 100830, China

<sup>b</sup>Department of Geomatic Engineering, University College London, Gower Street, WC1E 6BT, London, UK

<sup>c</sup>Department of Civil Engineering, Ryerson University, Toronto, Ontario M5B 2K3, Canada

<sup>d</sup>Department of Land Surveying and Geo-Informatics, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong

<sup>e</sup>Center for Remote Sensing and Mapping Science, Department of Geography, The University of Georgia, Athens, GA, USA

<sup>f</sup>School of Civil Engineering and Geosciences, Newcastle University, Newcastle upon Tyne NE1 7RU, UK

<sup>g</sup>IGN Research and Education, Institut National de l'Information Géographique et Forestière, Saint-Mandé Cedex, France

<sup>h</sup>Institute for Photogrammetry and GeoInformation, Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover, Germany

<sup>i</sup>Institute for Cartography and Geoinformatics, Leibniz Universität Hannover, 30167 Hannover, Germany

<sup>j</sup>Department of Civil, Environmental and Geodetic Engineering, The Ohio State University, USA

<sup>k</sup>School of Civil and Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney NSW 2052, Australia

### 1.1.1. Introducción

#### 1.1.1.1. Antecedentes

“Información desde imágenes” fue adoptado como lema de la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Percepción Remota (ISPRS) en su XIX Congreso en Ámsterdam en el año 2000. La ISPRS promueve la extracción y utilización de información desde imágenes, mediante el fomento y la facilitación de la investigación y el desarrollo en sus áreas de actividad científica, avanzando en el conocimiento a través de redes científicas, estimulando la cooperación internacional, persiguiendo la integración interdisciplinaria, facilitando la educación y la capacitación, mejorando y explorando nuevas aplicaciones, y desarrollando el reconocimiento público de la fotogrametría, la teledetección y la ciencia de la información espacial. La información desde imágenes, en el lenguaje de ISPRS, se obtiene utilizando los principios de percepción remota, fotogrametría y ciencia de la información espacial.

- a. **Percepción remota:** Es la ciencia y la tecnología de capturar, procesar y analizar imágenes, junto con otros datos físicos de la Tierra y los planetas, desde sensores en el espacio, en el aire y en tierra. Las observaciones remotas de la Tierra desde sensores aerotransportados y espaciales, en sinergia con mediciones in situ y manuales, proporcionan la base para mapear actividades humanas y naturales; para el monitoreo de procesos basado en datos físicos y empíricos; para evaluar y mitigar desastres; para identificar y evaluar recursos no renovables; para monitorear cambios temporales en el clima, el suelo y el mar; y para muchas otras aplicaciones. Las descripciones espaciales y semánticas de objetos, características y procesos se derivan de medidas de una, dos y tres dimensiones (3D), y la interpretación de sus atributos de señal electromagnética y acústica, mediante instrumentos ópticos, termales y de microondas, activos y pasivos, y dispositivos de sondeo.
- b. **Fotogrametría:** Es la ciencia y la tecnología de extraer información geométrica y temática tridimensional confiable, a menudo a lo largo del tiempo, de objetos y escenas de datos desde imágenes y datos de rango. Los datos resultantes se pueden utilizar para el desarrollo de bases de datos espaciales y Sistemas de Información Espacial (SIS) en formas digitales, gráficas y de imágenes. La tecnología se emplea para mediciones tridimensionales basadas en imágenes, en mapeo, ingeniería, registro patrimonial, análisis forense, robótica, sistemas de asistencia al conductor, aplicaciones médicas, videojuegos y otros campos, donde proporciona información geométrica y semántica de objetos, para completar bases de datos espaciales y para crear escenas de realidad virtual con modelos texturizados de la vida real.

- c. **Ciencia de la información espacial:** Se ocupa del modelado, el almacenamiento, el procesamiento, la recuperación, la aplicación y la comunicación de información con una referencia espacial. El empleo de conceptos y métodos desde la ciencia de la información espacial es un paso esencial en el proceso de obtención de información útil desde imágenes, ya que típicamente la descripción y ubicación de objetos y procesos, así como las relaciones temporales entre estos objetos físicos, deben integrarse con datos socioeconómicos y de otro tipo, para fines de análisis, simulación, predicción y visualización. La ciencia de la información espacial se ocupa, por ejemplo, de la minería de datos espaciales, la interoperabilidad y la integración de datos, el análisis visual, las perspectivas espacio-temporales en el big data, la visualización y generalización, la internet de las cosas, redes sociales, y la interacción humano-computador. Se aplica en planificación y gestión de transporte, planificación urbana e infraestructura, gestión de recursos y tierras, ciudades inteligentes, gestión de desastres, monitoreo ambiental, salud pública, seguridad, y en la comprensión de muchos otros procesos y fenómenos naturales y antropogénicos.

Cabe señalar que los tres temas se superponen. En primer lugar, aunque la fotogrametría ya está establecida, hoy se la considera parte del campo más amplio de la percepción remota. Sin embargo, en aras de la continuidad, se discutirán ambos temas por separado en este capítulo, con énfasis en las imágenes terrestres y aéreas cuando se refiere a la fotogrametría, y en los datos satelitales cuando se refiere a la percepción remota. Además, la fotogrametría constituye uno de los pilares de la moderna “visión artificial” (Förstner, 2009). En segundo lugar, aunque en ocasiones se entiende que la ciencia de la información espacial incluye la captura de datos y, por lo tanto, a la fotogrametría y la percepción remota, se considerará que esta ciencia se ocupa principalmente de utilizar la información adquirida desde las imágenes y almacenada en una base de datos, con el fin de enfatizar el enfoque en la imagerie y la explotación de imágenes. Por lo tanto, se puede percibir que la base de datos espacial forma una interfaz entre la fotogrametría y la percepción remota, por un lado, y la ciencia de la información espacial, por el otro.

#### 1.1.1.2. Información desde imágenes

La importancia de la información desde imágenes ha sido ampliamente reconocida en la última década (Li et al., 2008; Zell et al., 2012). La aplicación de imágenes es ahora omnipresente, con una mayor disponibilidad de imágenes de satélite de muy alta resolución, imágenes y escaneo en terreno, sensores económicos (por ejemplo, teléfonos inteligentes), y plataformas (por ejemplo, sistemas de aeronaves no tripuladas), complementados con una capacidad de procesamiento en rápido crecimiento y el avance en las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TICs).

Las imágenes aéreas y satelitales se han utilizado exitosamente en una variedad de áreas tales como el mapeo topográfico, la planificación urbana, la evaluación ambiental, silvicultura, agricultura de precisión, recursos hídricos y monitoreo de desastres. También se ha manifestado una creciente demanda de información fiable y actual a partir de imágenes, en muchas áreas de beneficio social (SBA), como en los programas nacionales de mapeo (Kelmelis et al., 2003), la gestión de desastres y riesgos (Altan et al., 2012), los estudios globales de cambio ambiental (Reid et al., 2010; Pereira et al., 2013), y el desarrollo de la sostenibilidad (Hecht et al., 2012).

Las imágenes basadas en el terreno (también conocidas como imágenes de corto alcance o terrestres) han experimentado un aumento similar en prominencia, logrando avances importantes en cartografía móvil, metrología industrial, medicina forense, preservación del patrimonio cultural, imágenes médicas, mediciones subacuáticas y las industrias del video juego y el cine (Grün, 2008), en particular desde el advenimiento de los sistemas de aviones no tripulados (UAS) como plataformas nuevas y flexibles. Tales imágenes no se usan exclusivamente en la comunidad fotogramétrica, sino también en muchas disciplinas próximas, en particular, en informática e ingeniería eléctrica, y típicamente bajo diferentes nomenclaturas, como la visión artificial (Hartley y Zisserman, 2003) y la robótica (Thrun et al., 2005). Hoy en día, el campo también está vinculado a diversas aplicaciones, tales como la percepción visual automática en tiempo real, la navegación visual, la conducción autónoma y la vida cotidiana asistida, que utilizan pistas visuales para enfrentar los desafíos sociales como la movilidad, la salud y el envejecimiento; esta es un área extremadamente activa de investigación y desarrollo.

Crowdsourcing, también conocido como información geográfica voluntaria (VGI), ha agregado una nueva dimensión a la adquisición de datos. Internet, y en particular la Infraestructura de Datos Geoespaciales (o Espaciales) (GDI o SDI),

se ha convertido en la clave para casi todos los aspectos de los datos geoespaciales, desde la adquisición hasta el procesamiento, gestión y análisis en bases de datos federadas y el intercambio de datos a través de servicios web estandarizados. Digital Globe, así como NASA World Wind, Google Earth y Microsoft Bing Maps 3D, son evidencias destacada de estos desarrollos.

Hay una serie de aspectos científicos, tecnológicos y organizacionales, relacionados con la información de las imágenes (figura 1). En primer lugar, los temas científicos incluyen una comprensión de las propiedades de la radiación electromagnética y su interacción con la atmósfera y con los objetos, los principios y modelos fundamentales para comprender y reconocer los patrones espacio-temporales en las imágenes, así como la abstracción, modelado y representación de objetos y fenómenos espacio-temporales y sus relaciones. Los conceptos, teorías y algoritmos se desarrollan y refinan continuamente para abordar estos problemas científicos. En segundo lugar, los aspectos tecnológicos se relacionan con una variedad de instrumentos, herramientas y sistemas, necesarios para realizar la adquisición de imágenes, la extracción de información y los servicios de información espacial. Sensores activos y pasivos, plataformas de imágenes, estaciones de trabajo fotogramétrico digitales (DPWS), procesamiento de imágenes y Sistemas de Información Geográfica (SIG), y servicios basados en la web que aprovechan una IDE completamente desarrollada, se encuentran entre las tecnologías modernas empleadas para este fin. Todavía quedan por resolver muchos problemas técnicos para el diseño, la prueba, la fabricación, y la comercialización, de nuevas herramientas y sistemas; un número cada vez mayor de organizaciones y empresas se involucran en tales actividades. En tercer lugar, deben abordarse aspectos organizacionales para garantizar que la ciencia y la tecnología mencionadas se apliquen a las necesidades sociales o particulares, como el mapeo topográfico, la ingeniería civil, documentación y protección del patrimonio, inventario de recursos, monitoreo de desastres y del medio ambiente, conducción autónoma, navegación visual, robótica, medición industrial e imágenes médicas. Esfuerzos significativos se han dedicado, y se deben dedicar continuamente, a los aspectos socioeconómicos y operacionales para garantizar que la información derivada de las imágenes se integre firmemente en los procesos de formulación de políticas, la aceptación pública y la explotación comercial. Tales aspectos incluyen la formulación de estándares técnicos, el desarrollo y la reingeniería de flujos de trabajo, la recopilación, procesamiento, control de calidad y garantía de calidad de conjuntos de datos masivos, y políticas para su uso, intercambio y difusión, así como educación y divulgación.

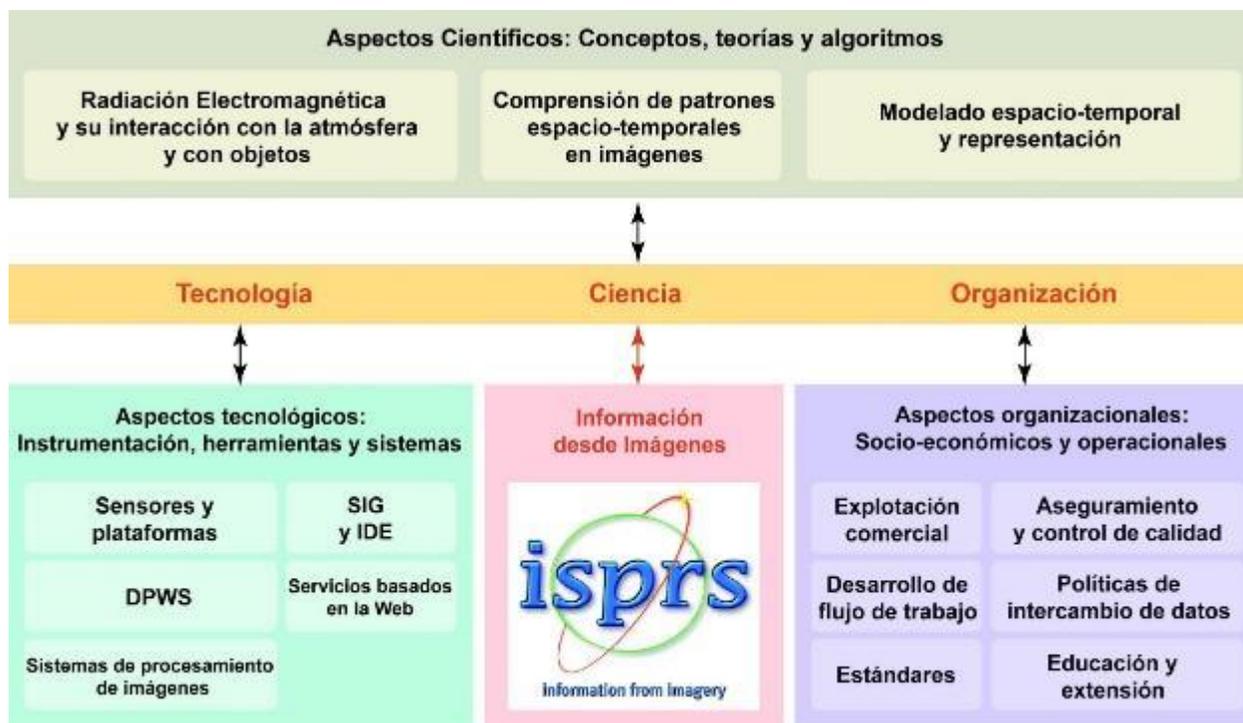


Figura 1: Aspectos científicos, tecnológicos y organizacionales, relacionados con la información de las imágenes.

Fuente: Elaboración propia.

### 1.1.1.3. El rol de la ISPRS

Es beneficioso examinar de cerca los desarrollos recientes en estos aspectos científicos, tecnológicos, sociales y organizacionales de vez en cuando, a fin de proporcionar una visión científica relevante para la comunidad. De hecho, la ISPRS tiene una larga tradición en esto. Durante cada congreso cuatrienal, la Asamblea General de la ISPRS (GA) ha formulado y aprobado una serie de resoluciones en orden de establecer el curso de las actividades científicas para el siguiente cuatrienio (Konecny, 1985; Trinder y Fritz, 2008). Tales resoluciones normalmente abordan temas nuevos o de rápida evolución, y se enuncian brevemente como referencia en el sitio web de la ISPRS. Para las áreas de actividad científica dentro de la ISPRS, también se desarrolla un conjunto de Términos de Referencia (TdR) para guiar las comisiones y grupos de trabajo de ISPRS. En 2008, la ISPRS publicó un libro del congreso con aproximadamente 40 artículos de revisión y resúmenes, para reunir los últimos avances en actividades científicas y proyectar direcciones futuras (Li et al., 2008). En 2010, en paralelo con sus celebraciones del centenario, el ISPRS revisó su plan estratégico para garantizar que se entienda el papel de las imágenes y que la información derivada se utilice para la mayor ventaja en toda la sociedad. Como resultado de la revisión estratégica, se ha enfatizado la identificación continua de nuevos desafíos y el desarrollo de una visión científica más clara como uno de los principales objetivos y tareas para la ISPRS y sus funcionarios.

El presente capítulo continúa esta línea, presentando una visión científica global para la información desde imágenes y estableciendo una agenda de investigación avanzada para la ISPRS. Los contenidos se basan en la síntesis de las resoluciones del XXII Congreso de la ISPRS en 2012, los TdR de las comisiones técnicas para el período 2012-2016, las presentaciones principales del congreso de 2012, los simposios de término medio de 2014 y otras reuniones recientes de la ISPRS, así como otros materiales publicados en disciplinas relevantes. La visión y las estrategias articuladas aquí, también se derivan de numerosas discusiones dentro del Consejo ISPRS y consultas con los presidentes de la comisión, el Comité Asesor Científico Internacional, el Comité Asesor de Política Internacional, así como numerosos expertos en la comunidad internacional.

El resto del capítulo está organizado de la siguiente manera: la sección 1.1.2 examina las nuevas demandas y desafíos que enfrenta nuestro campo con énfasis en la observación de la Tierra desde el espacio, señalando que existen requisitos similares también para las otras áreas de la fotogrametría, la percepción remota y la ciencia de la información espacial. El estado del arte de la información de las imágenes y las tendencias actuales se revisan en la sección 1.1.3. Los temas de investigación científica para el futuro se analizan en la sección 1.1.4. La sección 1.1.5 resume las conclusiones alcanzadas en este documento.

### 1.1.2. Desafíos mayores

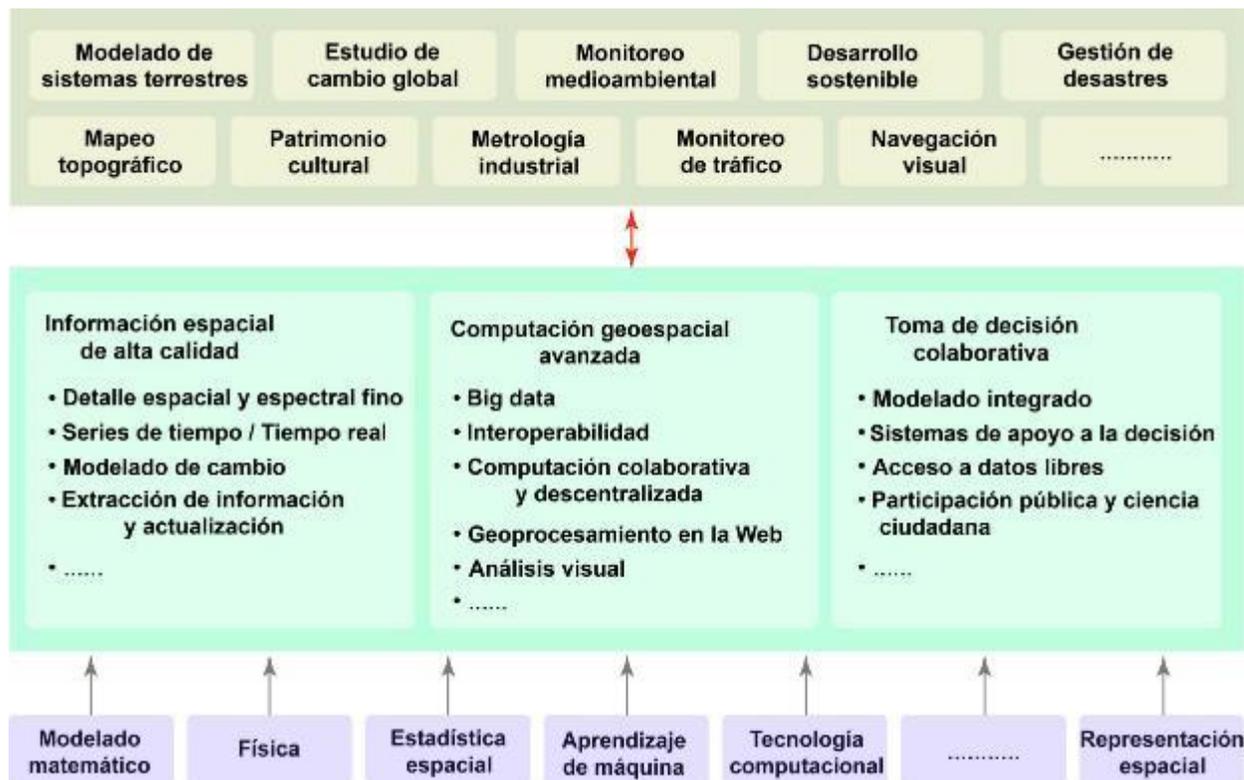
La humanidad se encuentra actualmente en una era en la que las ciencias espaciales desempeñan un papel destacado en la preparación de información para el público en general. Cada vez hay más exigencias en la aptitud para el uso de la información espacial, ya que la humanidad se enfrenta a una serie de grandes desafíos sin precedentes, por ejemplo, en cambio climático (Schiermeier, 2013) y desarrollo sostenible (Hecht et al., 2012), pero también en movilidad, salud y seguridad. Los factores clave para hacer frente a estos grandes desafíos son: proporcionar información de alta calidad, habilitar la informática geoespacial avanzada, y apoyar la resolución colaborativa de problemas (figura 2). Estos factores se discuten más a fondo a continuación, centrándose en una perspectiva de observación de la Tierra. Como los dos primeros factores tienen una base científica y técnica, también son el foco de las secciones 1.1.3 y 1.1.4 de este documento de visión científica.

#### 1.1.2.1. Información espacial de alta calidad

La información de alta calidad (es decir, oportuna, completa, temáticamente correcta, así como geoméricamente precisa y confiable) de las imágenes siempre ha sido un requisito clave para cualquier aplicación. Por ejemplo, la comprensión y previsión de los procesos del sistema terrestre requieren una variedad de información confiable a partir de imágenes de la Tierra, su entorno y otros objetos y procesos físicos (Suresh, 2012). Dicha información puede referirse a la topografía, la cobertura y uso del suelo, el catastro, la distribución de la población y la contaminación, entre otros (UN-GGIM, 2013). Las diferentes comunidades de usuarios generalmente tienen sus propios conjuntos específicos de

variables a ser derivadas de las imágenes, por ejemplo las Variables Esenciales de Biodiversidad (EBV) para la comunidad ecológica, cambios en la cobertura del suelo para la comunidad de cambio climático, e información topográfica y semántica detallada para las agencias cartográficas nacionales y gobierno. Se han lanzado una serie de programas e iniciativas nacionales, regionales e internacionales para optimizar la explotación de las imágenes. Dichas iniciativas tienen como objetivo proporcionar la información correcta, en el lugar correcto, en el momento preciso, a las personas adecuadas, para tomar decisiones apropiadas (Pereira et al., 2013; Whitcraft et al., 2015).

Se necesita información de alta calidad y alta resolución para diversas aplicaciones, tales como el monitoreo costero (Addo et al., 2008) y los estudios de glaciares (Kunz et al., 2012). Estos datos a menudo se usan no solo para monitorear, sino también para calibrar y validar modelos ambientales. La resolución espacial en la observación de la Tierra desde el espacio ha mejorado continuamente, por ejemplo, yendo de 80 m para Landsat-1 en 1970 a 30 m para Landsat-7 en los 90s, y a los actuales 0,31 m para WorldView-3 en 2015; por su parte, desde aeronaves y UAS se pueden obtener imágenes a nivel centimétrico. Como resultado, se han desarrollado productos de datos geospaciales de mayor resolución a escala local, nacional y mundial. Un ejemplo reciente para un conjunto de datos globales es Globaland30 (conjunto de datos globales de cobertura terrestre a 30 m de resolución, Chen et al., 2014a), donado por China a las Naciones Unidas en 2014. Objetivos similares se persiguen con la iniciativa europea INSPIRE que se esfuerza por armonizar datos topográficos de alta resolución en todo el continente. Además, se requiere información de cobertura terrestre a una resolución de 1-2 m para estudios urbanos (Belgiu et al., 2014). Tal cambio a la resolución fina representa un desafío importante científica, técnica y organizativamente.



**Figura 2: Principales desafíos que enfrenta la comunidad de ISPRS, con aplicaciones en la parte superior de la figura, desafíos en el medio y disciplinas de apoyo a continuación.**

*Fuente: Elaboración propia.*

La Tierra es un planeta dinámico con cambios que tienen lugar a diferentes escalas de tiempo. Monitorear tales cambios y mapear sus impactos, requiere secuencias de imágenes para recopilar información de series de tiempo (Kuenzel et al., 2015). Por ejemplo, desde un punto de vista de riesgos meteorológicos y climáticos, un sistema de predicción uniforme debería ser capaz de utilizar imágenes de horas recientes, estaciones y de décadas, desde locales hasta globales, para todo tipo de riesgos (McBean, 2014). Algunos nuevos sistemas de observación han entrado en operación, y muchos más están planeados, para el monitoreo y modelado del planeta dinámico. La extracción de información sobre cambios

en series de tiempo a partir de copiosas cantidades y tipos de datos, para evaluar los impactos en una variedad de problemas sociales, económicos, políticos y ambientales, en todas las escalas, conduce, utilizando todas las plataformas de imágenes disponibles, a preguntas que hoy no tienen una respuesta confiable y, por lo tanto, necesita más investigación para llevarse a cabo.

Lo mismo es válido para procesar y analizar datos terrestres. Con el advenimiento de los sistemas multisensor, que incluyen cámaras digitales de foto y video, escáneres láser y dispositivos de posicionamiento/navegación, las secuencias de imágenes de alta frecuencia son ahora capturadas desde UAS y camionetas móviles de mapeo a velocidad de tráfico normal. En particular los UAS, que constituyen una genuina tecnología habilitadora, prometen ofrecer soluciones innovadoras y flexibles a muchos de los problemas planteados en este párrafo, siempre que el área del proyecto no sea demasiado grande. Al mismo tiempo, tienen sus propios desafíos de investigación, por ejemplo, cuando se trata de vuelos en constelación y computación descentralizada, pero también en términos de seguridad y privacidad de datos. Aunque la interpretación automática de imágenes es una tarea formidable en sí misma (ver también la sección 1.1.3), la obtención de información significativa y de alta calidad a partir de estos grandes conjuntos de datos, presenta problemas de investigación específicos y adicionales que se abordan usando principios de, por ejemplo, reconocimiento de patrones y machine learning (aprendizaje de máquina).

### **1.1.2.2. Computación geoespacial avanzada**

Con los rápidos avances en percepción remota y crowdsourcing, así como en redes de sensores terrestres y simulación computacional, se producen, acceden, analizan, integran, almacenan y recuperan diariamente datos altamente heterogéneos de muy diferentes orígenes (Conti et al., 2012). Esto implica que estamos entrando en un mundo intensivo en datos o en una era del llamado big data, y enfrentamos otro desafío: la informática geoespacial avanzada (Bryan, 2013). Dado que el análisis a menudo debe hacer uso de diferentes conjuntos de datos, se tiene que garantizar la interoperabilidad geométrica y semántica de estos datos (McInerney et al., 2012). Idealmente, una plataforma de información espacial basada en la web, capaz de acceder a las bases de datos federadas, facilitaría el uso de estos conjuntos de diversos y distribuidos datos. En este sentido, la investigación y el desarrollo son necesarios para resolver problemas claves como la traducción ontológica-cruzada automatizada y los servicios web interoperables.

Se requieren nuevas técnicas y herramientas computacionales para filtrar información extraña y revelar patrones ocultos. A menudo, este desafío debe ser resuelto en un entorno de colaboración, llamando a la computación descentralizada. Un aspecto crítico es si los algoritmos y modelos ya desarrollados podrían cumplir con el entorno operacional o experimental (Hansen y Loveland, 2012). El otro es si podemos tener una implementación e integración flexible de los algoritmos y modelos de análisis de datos existentes. Con base en estándares abiertos como los del OGC (Open Geospatial Consortium), los algoritmos y modelos de procesamiento se pueden encapsular y exponer como servicios web en una arquitectura flexible y distribuida. Un ejemplo es la iniciativa de Modelo Web del GEO (Grupo de Observación de la Tierra) (Nativi et al., 2013). Este permite descubrir los algoritmos y modelos deseados a partir de registros y repositorios del servicio web, y reutilizarlos combinándolos en flujos de trabajo complejos a través de la composición de servicio y su ejecución sobre una arquitectura distribuida (McInerney et al., 2012; Zhao et al., 2012).

Muchos sistemas de visualización actuales son específicos de dominio o de aplicación y requieren un cierto compromiso para comprender y aprender a usarlos, lo que a veces dificulta su uso. Se necesitan nuevas herramientas de animación e interacción, como las desarrolladas en análisis visuales (Andrienko et al., 2014) para permitir un mejor análisis y una mejor comprensión de los conjuntos de datos masivos y dinámicos (Hey y Trefethen, 2005).

### **1.1.2.3. Soporte de decisión colaborativo**

Como muchos problemas que involucran información espacial son bastante complejos, la cooperación interdisciplinaria y transfronteriza, así como los sistemas avanzados de apoyo a la toma de decisiones, están en demanda. Un ejemplo de colaboración interdisciplinaria es la preparación de la agenda de desarrollo post 2015, dirigida por la ONU (Organización de Naciones Unidas), para implementar un conjunto de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) (Hecht et al., 2012). Dado que el desarrollo sostenible tiene dimensiones económicas, ambientales y sociales, una combinación de investigación disciplinaria e interdisciplinaria sobre “el futuro que queremos” ha sido testigo de una transición, desde

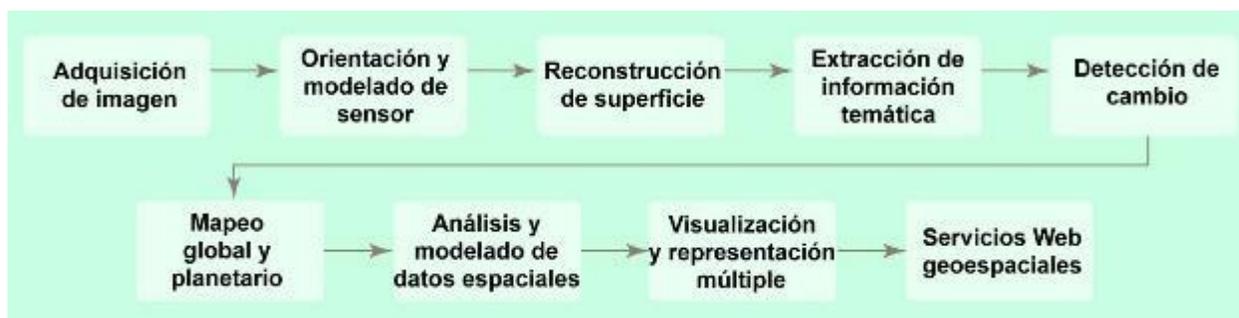
ser dominado por las ciencias naturales a involucrar a toda la gama de ciencias naturales, de ingeniería y sociales (Pereira et al., 2013; Kauffman y Arico, 2014). Otro ejemplo es el programa Future Earth del Consejo Internacional de Ciencia (ICSU), cuyo objetivo es movilizar a la comunidad científica internacional en torno a una década centrada en la investigación para apoyar el desarrollo sostenible en el contexto del cambio ambiental global (Reid et al., 2010; O'Riordan, 2013). La ISPRS trabaja con sociedades hermanas, particularmente a través de ICSU y el Consejo Conjunto de Sociedades de Información Geoespacial (JBGIS), para contribuir a este objetivo.

Desde el punto de vista técnico, los sistemas están en demanda para presentar evidencia observacional, generar narrativas de políticas y enmarcar conjuntos de suposiciones, durante la toma de decisiones políticas (Pielke et al., 2011; Schubert et al., 2015). A menudo, es necesario debatir cuestiones de política en el contexto de información espacialmente referenciada, potenciada por tecnologías de trabajo cooperativo, respaldado por computador (CSCW) o groupware, para permitir a los responsables políticos y al público (o ciudadanos), presentar sus perspectivas, resolver disputas espaciales, y tomar e implementar decisiones. En muchos casos, se necesita una integración de sensores, modelos de análisis específicos de dominio y capacidades de monitoreo.

### 1.1.3. Estado del arte de la información desde imágenes

En los últimos años, hemos sido testigos de importantes avances científicos y tecnológicos en la extracción de información desde imágenes. Los temas claves incluyen el desarrollo de cámaras aéreas digitales, sistemas de aviones no tripulados (UAS) como nuevas plataformas flexibles, orientación automática y concordancia densa de imágenes de múltiple vista, análisis de secuencia de imágenes, procesamiento automatizado de datos de escaneo láser terrestre y móvil (LiDAR), sensores ópticos y de radar de muy alta resolución, satélites pequeños y constelaciones de satélites, así como redes de geosensores. Otros desarrollos relevantes incluyen crowdsourcing, enlaces y big data, bases de datos espaciales federadas, análisis visuales, servicios de información distribuidos en la web, infraestructuras de datos espaciales, así como ciencia espacial libre. Estos temas centrales han sido aumentados por los avances en las tecnologías relacionadas, como los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) y la topografía inercial.

En esta sección, se resume el estado del arte en la investigación sobre la extracción de información desde imágenes. Comenzando con la adquisición de imágenes, seguido de la orientación de estas, la reconstrucción de superficie y la extracción de información temática, la detección de cambios, el mapeo global y, luego, yendo con el modelado y análisis de datos espaciales, la visualización y servicios basados en la web (figura 3). Partes de esta secuencia constituyen la cadena de procesamiento tradicional de adquisición de datos topográficos a partir de imágenes, mientras que otras secuencias de procesamiento son obviamente también factibles.



**Figura 3: Áreas activas de investigación para obtener información de las imágenes.**

*Fuente: Elaboración propia.*

#### 1.1.3.1. Adquisición de imagen

La adquisición de imágenes ha experimentado un desarrollo fenomenal en las últimas dos décadas, evidenciado por una proliferación sin precedentes de sensores de imágenes y plataformas. Hasta el milenio, las cámaras aéreas de gran formato basadas en película (film) representaban el caballo de batalla de la fotogrametría aérea; hoy en día, se utiliza una gran variedad de sensores de imagen activos y pasivos en la producción en plataformas, que van desde trípodes,

pasando por UAS, hasta satélites. Además, ha habido un cambio de paradigma en la adquisición de imágenes, ya que el modelo de sensores integrados ha reemplazado a los enfoques basados en sensores de imagen individuales de larga data. Los sensores de georreferenciación, incluidos los sistemas integrados de GNSS y Unidad de Medida Inercial (IMU), son dispositivos ampliamente utilizados para soportar la orientación de uno, o típicamente más, sensores de imagen múltiples.

Con el avance de las tecnologías de sensores de imagen y los desarrollos generales de hardware, tasas de adquisición de imágenes más rápidas están fácilmente disponibles y el registro de grandes cantidades de datos es factible, produciendo datos geoespaciales de excelente calidad (Cramer, 2011). Combinado con un número cada vez mayor de plataformas, los datos de imagen se pueden adquirir con tasas de repetición más altas, proporcionando una mejor resolución temporal, como lo muestra la tendencia a pasar de estructuras de datos espaciales de tres a cuatro dimensiones (3D más tiempo). Por ejemplo, los UAS pueden proporcionar productos que cumplen con todos los requisitos del mapeo nacional (Cramer, 2013), y también de aplicaciones como el monitoreo costero y glacial, y el monitoreo del crecimiento de la vegetación en una base diaria. Del mismo modo, las nuevas constelaciones de satélites pueden proporcionar una cobertura de imagen diaria (o incluso varias veces al día), por ejemplo, para monitorear desastres naturales o el flujo de tráfico. Además, tasas de imágenes más altas permiten una mayor superposición de imágenes, lo que resulta en un mejor desempeño en la extracción de características, así como en la generación de nubes de puntos a partir de imágenes multiestéreo. Las cámaras mono y estéreo de alta velocidad se utilizan cada vez más en la industria automotriz para grabar escenas dinámicas, por ejemplo, en investigaciones de seguridad del automóvil; estando también en uso en deportes.

Siguiendo la introducción de sensores activos hace algunas décadas, ahora descubrimos que los sensores de imágenes activos y pasivos tienen más o menos la misma cuota del mercado de imágenes aerotransportadas, caracterizado por cámaras aéreas digitales de gran formato y sistemas LiDAR, mientras que radar SAR interferométrico aerotransportado (InSAR / IfSAR) representa solo un nicho de mercado. En plataformas satelitales, los sensores pasivos multiespectrales son dominantes, aunque los sistemas SAR han mostrado desarrollos notables y proporcionan un volumen rápidamente creciente de datos geoespaciales globales (Krieger et al., 2007; Zink et al., 2014).

Una tendencia reciente en la adquisición de imágenes ha sido el uso cada vez mayor de sensores de imagen de calidad de consumo, como cámaras web y cámaras de teléfonos inteligentes. Si bien estos sensores han existido por más de una década, su nivel de rendimiento, en términos de calidad de imagen y velocidad de transferencia, fue demasiado modesto para soportar el uso masivo hasta hace unos años. Dado que estos dispositivos son omnipresentes y, con frecuencia, tienen un georreferenciamiento bastante preciso, la información geográfica voluntaria (VGI, Sui et al., 2013) que recopilan podría decirse que conforma el mayor volumen de datos geoespaciales hoy en día. Si bien estos enfoques de crowdsourcing están lejos del mapeo convencional, tales flujos de datos ya se están convirtiendo en una fuente principal de imágenes para el monitoreo y la gestión de situaciones de emergencia, o en aplicaciones como la documentación del patrimonio cultural (Goodchild y Glennon, 2010). Del mismo modo, la cantidad de cámaras de vigilancia está creciendo constantemente, y también pueden ser compatibles con aplicaciones relacionadas con geografía humana. Esto plantea desafíos en el manejo de grandes cantidades de datos, para extraer información útil de dichas fuentes, teniendo en cuenta las diferencias en la calidad de los datos y también en la privacidad de los mismos.

La separación entre fotogrametría aérea/espacial y de corto alcance, que fue muy clara hace algunas décadas, se ha vuelto cada vez más borrosa principalmente debido a dos factores. En primer lugar, las campañas aéreas y espaciales se han vuelto mucho más diversas, con sensores menos o no estandarizados que incluyen imágenes oblicuas, de superposición múltiple (y cambiante), y orientación directa del sensor. En segundo lugar, las imágenes se combinan cada vez más con la información de “rango” de LiDAR, ya que la integración ocurre a lo largo de líneas similares para enfoques aéreos y de corto alcance.

Otra tendencia notable es que las diferencias en las características de las imágenes ópticas a bordo de aviones y satélites están disminuyendo, puesto que satélites comerciales de alta resolución recientemente lanzados pueden adquirir datos a resoluciones espaciales tan altas como 30 cm de distancia de muestreo de terreno (GSD, Dowman et al., 2012), que alguna vez fue la resolución típica para la mayoría de imágenes aéreas. En una tendencia similar, cámaras aéreas de alto rendimiento pueden entregar imágenes a 5 cm de GSD (Sandau, 2009).

### 1.1.3.2. Modelación y orientación del sensor

El rápido desarrollo de sensores digitales en los últimos años ha mejorado significativamente la calidad de datos de imagen y de rango (mucho más alta relación señal-ruido y mucho mayor rango dinámico), y ha aumentado considerablemente la capacidad de adquirir imágenes estéreo altamente superpuestas, que conducen a un mayor nivel de redundancia en las observaciones. Estas ventajas han dado lugar al desarrollo de algoritmos y métodos mucho más robustos para la orientación de imagen y de sensores de rango (también llamada estimación de posición), y para la reconstrucción de superficies.

El modelado de sensores y la calibración geométrica son generalmente bien entendidos (Remondino y Fraser, 2006), mientras que la calibración radiométrica (Honkavaara et al., 2009) y una consideración detallada de los efectos ambientales, aún contienen una serie de preguntas sin resolver; esta última en particular para sensores de rango, ya que las condiciones atmosféricas influyen en la velocidad de la luz mucho más que la dirección de los rayos de luz. La explotación de secuencias de imágenes en 3D, también requiere de sincronización temporal; una solución es, por ejemplo, la entregada por Raguse y Heipke (2009). Las cámaras generalizadas, aquellas que no siguen las leyes de la perspectiva, han sido empleadas durante mucho tiempo para modelamientos geométricos rigurosos en fotogrametría y percepción remota, un ejemplo es el uso de cámaras de línea múltiple para trabajo topográfico (Hofmann et al., 1982) y planetario (Spiegel, 2007); modelos para lentes de ojo de pez fueron, por ejemplo, descritos en Abraham y Förstner (2005). Los modelos para cámaras generalizadas también se discuten en la literatura de visión artificial (Grossberg y Nayar, 2001).

La orientación automática de imagen ha sido un campo muy activo en la comunidad fotogramétrica durante mucho tiempo. La orientación de imagen tiene como objetivo reconstruir las coordenadas de la perspectiva central y la dirección de visual durante la captura de imágenes (y algunas veces también los parámetros de orientación interior), de un conjunto potencialmente grande de imágenes desordenadas u ordenadas, con líneas base cortas o anchas. Se han propuesto y desarrollado diferentes enfoques, que incluyen soluciones automáticas precisas y personalizadas del tipo adoptado por los sistemas de metrología visual en medición industrial. Más recientemente, también se han vuelto muy prominentes las comunidades de visión artificial (estructura desde movimiento, o SFM) y robótica (localización y mapeo simultáneos, o SLAM), con varias estrategias ahora comunes. Tales enfoques han generado un renovado interés y una actividad estimulada sobre los métodos de imagen, dentro de una amplia variedad de áreas de aplicación, que van desde el patrimonio cultural hasta las ciencias de la Tierra.

Se pueden distinguir diferentes avances notables en la orientación de imagen automatizada: uno es el desarrollo de detectores de características invariables, también llamados operadores de puntos de interés, tales como los operadores de Förstner (Förstner y Gülch, 1987) y Harris (Harris y Stephen, 1988); transformación de características de escala invariable (SIFT, Lowe, 2004); y características robustas aceleradas (SURF, Bay et al., 2008). Otro es el desarrollo de nuevas estrategias de calce para puntos de interés a través de imágenes y técnicas de forma cerrada, para estimar una posición relativa inicial entre pares de imágenes (Nistér, 2004; Frahm et al., 2010; Mayer, 2014). Los errores típicos que se producen en el calce automático se detectan usando algoritmos de tipo RANSC (muestreo aleatorio consensuado) (Fischler y Bolles, 1981). Para requisitos homogéneos y de alta precisión, un ajuste bundle (de lote) se realiza generalmente como paso final de la orientación de imagen.

La orientación del sensor de rango utiliza el mismo concepto matemático de las transformaciones de coordenadas 3D, pero el posicionamiento se calcula basándose en el calce de nubes de puntos 3D individuales, potencialmente aumentadas por características de control terrestre señalizado, típicamente esferas o superficies planas (Brenner et al., 2008). La calibración de los sensores de rango puede ser un desafío para la alta precisión, pero en general las soluciones están disponibles (Lichti et al., 2011). Un algoritmo popular para el calce de nubes de puntos es el algoritmo iterativo de punto más cercano (ICP, Besl y McKay, 1992) y sus derivados; existen diferentes soluciones para medir automáticamente las posiciones de las características de control terrestre, en el conjunto de datos de la nube de puntos. También se han sugerido soluciones para la estimación combinada de posición de datos de imagen y de rango, que están en uso actualmente.

### 1.1.3.3. Reconstrucción de superficie

Después del ajuste de lote, un conjunto disperso de coordenadas 3D de los puntos de interés coincidentes en las vistas está disponible. Este conjunto de puntos se usa, a menudo, como una solución inicial para una reconstrucción de superficie pixel-wise (también llamada reconstrucción “densa”, es decir, que genera una profundidad o una elevación por pixel), haciendo coincidir las imágenes mediante restricciones derivadas de la geometría epipolar. Se han desarrollado varios enfoques de reconstrucción con métodos basados en energía (Pierrot-Deseilligny y Paparoditis, 2006; Hirschmüller, 2008; Furukawa y Ponce, 2010; Strecha et al., 2010; Bulatov et al., 2011), que proporcionan los mejores resultados a la fecha. Estos buscan encontrar la mejor solución global (es decir, la mejor superficie), minimizando la suma ponderada entre un término de datos que describe los costos de correspondencia locales y un término de regularización que evalúa la plausibilidad global de la forma de la superficie, por ejemplo, en términos de suavidad y continuidad de tramos. Las soluciones se derivan típicamente utilizando algoritmos de teoría de grafos o programación dinámica. En particular, la coincidencia semi-global (SGM, Hirschmüller, 2008) ha sido ampliamente adoptada, tanto en la comunidad fotogramétrica como en otras (Gehrig et al., 2009). La mayoría de estos métodos se desarrollaron para aplicaciones de corto alcance con grandes diferencias de profundidad y, por lo tanto, también son especialmente adecuados para imágenes aéreas y satelitales de escenas urbanas con importantes discontinuidades de altura (Haala, 2011).

Las superficies reconstruidas a menudo se utilizan junto con la información de brillo de la imagen, para facilitar la comprensión 3D de la escena y la extracción de información temática. Los métodos de reconstrucción de superficie basados en optimización permiten la reconstrucción de detalles 3D tan pequeños como el tamaño de los elementos estructurantes sobre los que se calculan los puntajes de similitud. Por ejemplo, cuando se utilizan imágenes aéreas de muy alta resolución (5-10 cm), las superestructuras de las partes superiores de techos (como ventanas abuhardilladas, chimeneas o terrazas) se pueden reconstruir (Brédif, 2010). A partir de estos modelos digitales de superficie (DSM) de alta calidad, se pueden generar verdaderas ortofotos, fusionando las partes centrales de las imágenes rectificadas. Con bastante frecuencia, se emplean técnicas basadas en optimización para encontrar la mejor combinación y costura entre todas las partes centrales de las imágenes correspondientes. Los artefactos restantes de este proceso a menudo se borran mediante técnicas de combinación aplicadas a las áreas de costura. Sin embargo, la calidad de dichas ortofotos puede ser inferior en áreas cercanas a discontinuidades tridimensionales (por ejemplo, borde de construcciones), ya que las técnicas de calce basadas en píxeles no pueden procesar discontinuidades 3D de forma limpia sin tener en cuenta explícitamente estas discontinuidades en el proceso de coincidencia.

### 1.1.3.4. Extracción de información temática

La extracción de información temática tiene una larga historia en fotogrametría y percepción remota (Mayer, 2008; Vosselman, 2009). Por un lado, se han desarrollado esquemas de detección y reconstrucción para objetos individuales, en su mayoría topográficos, desde imágenes de alta resolución y nubes de puntos 3D, por ejemplo, para edificios (Rottensteiner et al., 2014) y caminos (Gerke y Heipke, 2008). Las nubes de puntos e imágenes a menudo se han procesado por separado (en parte porque solo había un conjunto de datos disponible), pero existen enfoques para las estrategias de procesamiento combinado. Por otro lado, las metodologías de clasificación que utilizan (por ejemplo la clasificación de máxima verosimilitud para imágenes satelitales, que se remontan a la década de 1970), se han empleado para esta tarea. Si bien la clasificación no entrega objetos per se, los resultados suelen servir como base para la detección y delineación de objetos individuales. Más recientemente, modernos métodos de discriminación para la clasificación –tales como AdaBoost (Chan y Paelinckx, 2008), Support Vector Machines (SVM, Mountrakis et al., 2011) y Random Forests (RF, Gislason et al., 2006)– se han aplicado en fotogrametría y percepción remota. Enfoques probabilísticos basados en modelos gráficos, como Markov Random Fields o Conditional Random Fields (CRF), se han adoptado para la clasificación basada en contexto con aplicaciones como la clasificación de fachadas (Yang y Förstner, 2011), el etiquetado de nubes de puntos (Niemeyer et al., 2014a), la segmentación para la reconstrucción de edificios en 3D (Lafarge y Mallet, 2012), y la clasificación multitemporal de imágenes de sensores remotos (Hoberg et al., 2015). El comportamiento de estos métodos de clasificación es bien entendido, y ofrecen una precisión razonable en una amplia gama de aplicaciones.

Las tareas de visualización de alto nivel para la comprensión de escenas también pueden sostenerse en modelos gráficos, pero requieren otros esquemas de representación de objetos o un diseño más complejo de gráfico subyacente. Por ejemplo, los modelos basados en piezas descomponen un objeto en sus componentes, cuya alineación relativa puede aprenderse desde las imágenes (Felzenszwalb et al., 2010) cuando se toman en cuenta los modelos 3D CAD (Zia et al., 2013). Las partes del objeto detectadas en una imagen pueden apoyarse mutuamente y así dar pistas para la detección y localización de todo el objeto, lo que da como resultado una identificación correcta de objetos, incluso si están parcialmente ocluidos. Los modelos jerárquicos (Yang y Förstner, 2011) integran el comportamiento escala-espacio de los objetos. Los procesos de punto marcado pueden considerar un modelo de objeto fuerte, en un marco estocástico basado en muestreo estadístico. Estos intentan encontrar la configuración de objeto más probable de acuerdo con los modelos de la forma y la alineación relativa de objetos individuales (Tournaire et al., 2010; Brédif et al., 2013). En los métodos de modelado basados en procedimientos, el conocimiento del modelo acerca de los objetos también puede representarse mediante gramáticas, usadas en combinación con muestreo estadístico, por ejemplo, para comprender la estructura de una fachada (Ripperda, 2008) y para modelar árboles caducos en secuencias de imágenes (Huang y Mayer, 2007). El modelado basado en procedimientos también se puede usar para acelerar la productividad del modelado semiautomático basado en imágenes, donde el conocimiento del modelo permite la reconstrucción de más partes de un objeto en base a un conjunto mínimo de mediciones realizadas por el operador humano. Este enfoque es particularmente útil para la verificación y el refinamiento en línea, al superponer el resultado de la reconstrucción sobre las imágenes (Cura et al., 2015).

El análisis de secuencias de imágenes ha hecho posible la detección y el seguimiento de objetos en movimiento a partir de imágenes de cámaras estáticas o dinámicas, sistemas de cámaras individuales o estéreo. Campos de movimiento muy densos pueden derivarse desde secuencias de imágenes mono o estéreo, en tiempo real (Rabe et al., 2010), utilizando un filtro de Kalman extendido (EKF) para conectar diferentes escenas a lo largo del tiempo. La segmentación de tales campos de movimiento puede emplearse para detectar objetos dinámicos en secuencias de imágenes de plataformas móviles, por ejemplo, automóviles (Kitt et al., 2010). Esta metodología ha alcanzado tal grado de madurez que la industria automotriz la implementa en los sistemas de asistencia al conductor. Un enfoque alternativo es seguir el rastreo mediante el paradigma de detección, donde los detectores de objetos se aplican a cuadros individuales para rastrearlos a lo largo del tiempo. Ejemplos incluyen la detección de peatones desde un equipo estéreo en movimiento (Schindler et al., 2010) y la detección de objetos en movimiento en secuencias de imágenes monoculares (Wojek et al., 2010; Klinger et al., 2014). Los filtros de partículas se pueden utilizar como una alternativa a un EKF, para modelar el comportamiento temporal de los objetos (Breitenstein et al., 2011). Una vez más, los modelos gráficos proporcionan un marco probabilístico para muchas de estas aplicaciones.

#### **1.1.3.5. Detección de cambios**

El valor de la información geoespacial depende críticamente de su coherencia con respecto al mundo real, y esto ha estimulado la investigación intensiva sobre el mapeo y monitoreo de cambios, así como sus aplicaciones a escala nacional y mundial. Se siguen desarrollando nuevas técnicas de detección de cambios (Lu et al., 2014). Los ejemplos incluyen detección de cambios y métodos de clasificación integrados (Chen et al., 2012), enfoques basados en diferencia de gradiente espectral (SGD) (Chen et al., 2013a), detección de cambios basados en objetos (Hussain et al., 2013), detección de cambios 3D (Qin y Grün, 2014), análisis de tendencias estacionales basados en fenología (Li y Wu 2014, Parmentier y Eastman, 2014), y enfoques basados en modelos de campo aleatorios (Helmholz et al., 2012; Benedek et al., 2015). Todo esto apunta a emplear efectivamente diferentes características inherentes a las imágenes y datos auxiliares para reducir los denominados pseudocambios, es decir, cambios en la apariencia que no son relevantes para la tarea en cuestión.

La recopilación de datos de crowdsourcing es otro tema de investigación activo (Goodchild y Glennon, 2010; Heipke, 2010), a menudo empleado para la detección de cambios. Tanto los voluntarios como los profesionales pueden recopilar y analizar información de cambios, utilizando plataformas basadas en la web. Geo-Wiki es una plataforma en línea para recopilar información de cobertura terrestre a partir de imágenes crowdsourced (Fritz et al., 2012), y se ha aplicado en la generación de mapas de cobertura terrestre (See et al., 2015). Se ha recopilado información geográfica crowdsourcing para la respuesta temprana y la gestión de crisis (Stange y Bothe, 2013). Datos de trayectoria GNSS desde sistemas de navegación de automóviles y de teléfonos inteligentes se han utilizado para predecir las condiciones del tráfico urbano,

extraer la geometría de la red vial (Zhang et al., 2010; Cao y Sun, 2014), y realizar análisis de movilidad humana (Huang et al., 2015). En este contexto, las imágenes (por ejemplo, de Flickr o Instagram) se usan a menudo en términos de sus metadatos (es decir, coordenadas y textos de anotación) y no necesariamente con respecto al contenido de la imagen, lo que requeriría de la interpretación de la misma.

A nivel nacional, la actualización rápida de las bases de datos geoespaciales se ha convertido en una prioridad principal de las agencias nacionales de cartografía (Heipke et al., 2008; Chen et al., 2014b). Una encuesta reciente realizada por la ISPRS con la ayuda del Grupo de Gestión de Información Geoespacial Global de las Naciones Unidas (UN-GGIM), muestra que algunos estados miembros de la ONU actualizan sus bases de datos geoespaciales una vez al año y muchos otros países han tenido éxito en completar o actualizar sus requerimientos de mapeo a las escalas críticas 1:5.000 a 1:50.000 (Konecny, 2013). Sin embargo, hay muchos otros países que necesitan mejorar su ciclo de actualización de las bases de datos cartográficas nacionales.

#### **1.1.3.6. Mapeo global y planetario**

El mapeo y el monitoreo global (Ban et al., 2015) y planetario (Heipke et al., 2007; van Gasselt y Nass, 2011) son otros temas actuales. Se han invertido esfuerzos en la derivación y el suministro de geoinformación global, como los modelos de elevación digital global (DEMs, Robinson et al., 2014), el mapeo de áreas quemadas (Mouillot et al., 2014), la rugosidad de superficie (Chen et al. 2014c), el cambio de la cubierta forestal (Hansen et al., 2013), y la valoración del servicio ecosistémico (Li y Fang, 2014). Varias iniciativas de monitoreo global se han lanzado o discutido, por ejemplo, para especies terrestres (Schmeller et al., 2015), hábitat (Lucas et al., 2015), agricultura (Whitcraft et al., 2015) y alteraciones de la vegetación inducidas por el clima (McDowell et al., 2015); junto con las tecnologías de monitoreo relacionadas (Aschbacher y Milagro-Pérez, 2012; El-Sheimy et al., 2015). Un desarrollo notable es el producto Globeland30 (Chen et al., 2015) que constituye la primera cubierta de suelo global a 30 m del mundo para los años 2000 y 2010, y comprende diez tipos de cobertura terrestre. Se desarrolló un enfoque basado en pixel-object-knowledge para lograr un compromiso entre efectividad (precisión) y eficiencia (nivel de automatización), con una precisión de clasificación global superior al 80%.

#### **1.1.3.7. Modelado y análisis de datos espaciales**

Modelar la realidad geográfica y los fenómenos espaciales de interés en forma digital es la base para la construcción de bases de datos geoespaciales, el desarrollo de la Tierra digital, globos virtuales y ciudades inteligentes (Wise, 2000; Craglia et al., 2012). El análisis espacial es la interpretación adicional del modelo digital para derivar conocimiento significativo o para explicar los fenómenos geográficos relacionados con las ubicaciones en la superficie de la Tierra (Miller, 2004). Las características del espacio geográfico tienen un impacto significativo en el contenido y el desempeño del modelado y análisis de datos espaciales.

Durante los últimos años, el modelado en 3D se ha convertido en una práctica común para muchas de las ciudades más grandes del mundo. Se desarrollaron muchos algoritmos y estructuras de datos para mejorar la eficiencia y calidad del modelado urbano. Estos incluyen CityGML para consultas semánticas (Kolbe, 2009; Gröger y Plümer, 2012), octrees para nubes de puntos de gran tamaño (Elseberg et al., 2013), y prior flexible para el modelado de edificios 3D (Xiong et al., 2015).

El modelado de datos espacio-temporales tiene como objetivo representar objetos y eventos con movimientos continuos y cambios de estado (van de Weghe et al., 2014), y manipular procesos dinámicos como el tráfico del flujo de vehículos o el movimiento de personas individuales (Fang et al., 2012). Estos enfoques se han aplicado en muchos campos, como en la identificación de fuentes y patrones espaciales de enfermedades y lesiones (Cusimano et al., 2010), la respuesta ante desastres en tiempo real, la mitigación y prevención (Ren et al., 2007), el monitoreo de recursos naturales y contaminantes (Obradovic et al., 2010), la navegación peatonal basada en puntos de referencia (Fang et al., 2012) y otros servicios basados en la ubicación (Conti et al., 2012).

La escala es otro tema fundamental en el modelado de datos espaciales. Se han desarrollado técnicas para el modelado a múltiples escalas de diversos tipos de datos espacio-temporales, tal como trayectorias y datos de procesos puntuales

(Bereuter y Weibel, 2013; Popa et al., 2015). Los efectos de escala también se han modelado para análisis de terreno basados en DEMs (Gao et al., 2012), análisis geográfico de datos de salud (Lee et al., 2014), análisis de distribución de especies (Moudrý y Šimová, 2012), la medición de la estructura de paisaje (Ricotta y Carranza, 2013), y simulaciones dinámicas de cambio de uso del suelo (Kim, 2013).

El big data geoespacial se ha convertido en un foco de análisis espacio-temporal en los últimos años, debido a la gran cantidad de datos que están adquiriendo los nuevos sensores y las nuevas fuentes de datos, como las redes sociales, trayectorias GNSS registradas por teléfonos móviles (Sester et al., 2014; Hahmann y Burghardt, 2013), y redes de sensores (Devaraju et al., 2015). Los datos recopilados con tales sistemas tienen las propiedades de ser abundantes, fluidos, de cambiar continuamente, en su mayoría georreferenciados, y estar (parcialmente) desestructurados. La explotación de la información implícita en los datos de estas fuentes, es un desafío que ofrece enormes oportunidades debido a sus características de tiempo real. Las técnicas de minerías han sido desarrolladas particularmente para VGI (Hagenauer y Helbich, 2012), trayectorias (Liu et al., 2012), datos de redes sociales (Majid et al., 2013), redes viales (Niu et al., 2011), y datos de movimiento (Bleisch et al., 2014). Un enfoque particular se encuentra sobre el big data espacio-temporal. Estos incluyen prismas espacio-tiempo probabilísticos de objetos en movimiento, incertidumbre temporal para la programación de viajes de actividades, detección y descripción de patrones de actividades dinámicas con datos de trayectoria de gran volumen, y el modelado y exploración del big data espacio-temporal.

Las relaciones espaciales han sido otro tema de interés. Se han observado discusiones sobre relaciones topológicas y de dirección, tales como la consulta descentralizada de las relaciones topológicas entre regiones (Jeong y Duckham, 2013) y la identificación de un marco unificador para relaciones direccionales y marcos de referencia (Clementini, 2013), una clasificación completa de relaciones espaciales utilizando el modelo de nueve intersecciones basado en Voronoi (Long y Li, 2013), un modelo de cómputo basado en números Euler para relaciones topológicas (Zhou et al., 2013), y relaciones de operación y lógica temporal para representar conocimiento de cambio (Chen et al., 2013b).

#### **1.1.3.8. Visualización y representación múltiple**

La visualización siempre ha sido un aspecto importante de la información espacial. Los atlas 3D en línea se han discutido, por ejemplo, por Sieber et al. (2012). Estos combinan las grandes tendencias del mapeo en 3D, aplicaciones móviles y en línea con diseño cartográfico y funcionalidad específica para atlas. Se han desarrollado panoramas 3D de múltiple perspectiva (Pasewaldt et al., 2014) y mapas de enfoque interactivos (van Dijk y Haunert, 2014). Se han aplicado técnicas de visualización para explorar diversos tipos de datos espaciales, como los datos de movilidad humana (Kwan et al., 2013), brotes de hepatitis A y E (Hughes et al., 2014), el cambio del uso del suelo (Vaz y Aversa, 2013), y los datos de islas de calor urbanas (Danahy et al., 2015).

El diseño de mapas efectivos ha recapturado la atención de la investigación en los últimos años (Li, 2012). La teoría de la información (Bjørke 2012; Ruiz et al., 2012) y la optimización multi-objetivo (Xiao y Armstrong, 2012) se han empleado para el diseño de mapas. La usabilidad es otro problema en la visualización (Joshi et al., 2014), que incluye la efectividad y la eficiencia de las técnicas de visualización. Con la efectividad en mente, surgen representaciones similares a mapas, como mapas esquemáticos y cartogramas (Buchin et al., 2014). En particular, se han desarrollado varios métodos para la generación automática de mapas esquemáticos (Ti y Li, 2014).

En la representación de mapas a escala múltiple, la investigación se centra en el paradigma basado en la escala (Li, 1996). Desarrollos notables son procesos de generalización totalmente automáticos para la producción de mapas (Stoter et al., 2014), generalización 3D, transmisión progresiva (Sester y Brenner, 2009; Kada, 2014), integración de datos de diferentes escalas y técnicas jerárquicas para la representación de redes viales (Li y Zhou, 2012; Zhou y Li, 2014; Benz y Weibel, 2014).

#### **1.1.3.9. Servicios web geoespaciales**

Los servicios web geoespaciales permiten el acceso en línea, y el procesamiento, de mapas y datos geoespaciales almacenados en uno o más servidores de datos geoespaciales. Su utilización ya ha tenido un impacto profundo en la gestión del conocimiento geoespacial, estructurando y automatizando flujos de trabajo dentro y entre organizaciones

que tratan con información e inteligencia basada en la ubicación, y aportando datos geoespaciales a la vida cotidiana de las personas a través del geobrowsing o la web geoespacial. Los últimos esfuerzos de investigación se han dirigido hacia el geoprocesamiento smart o inteligente en la web, que incluye servicios web habilitados en semántica, detección inteligente de servicios, encadenamiento de servicios dinámicos y automáticos y flujos de trabajo compuestos, y balanceo de carga de servicios, idealmente basado en preferencias personalizadas de usuario o aplicación (Li et al., 2011; Veenendaal et al., 2014).

Numerosos desarrollos han ejemplificado los avances en el campo. Los servicios de mapeo se han convertido en la nueva plataforma que permite a una multitud de usuarios publicar, consumir, comparar y analizar datos colaborativamente, facilitando el proceso de crowdsourcing de datos geoespaciales o VGI (Han et al., 2015; Liu et al., 2015). Esto ha proporcionado servicios de nube y de web automáticos, analíticos, compartidos y de código abierto para la información geoespacial. En el manejo de servicios de geoprocesamiento se han estudiado enfoques sintácticos y semánticos, y lenguaje de servicio web y de modelado de procesos. El surgimiento de internet 3D, con una amplia disponibilidad de soluciones accesibles basadas en la web (que explotan desarrollos ya mencionados en orientación de sensores, reconstrucción de superficies, entre otros), como Microsoft Photosynth, Autodesk 123d Catch y globos virtuales (por ejemplo, Google Earth, Microsoft Bing Maps 3D), ha permitido la generación y visualización sencilla de datos 3D desde varias fuentes. La computación en la nube ha desempeñado un papel activo en el mapeo web y los SIG porque vincula computadoras dispares para formar una gran infraestructura, aprovechando los recursos no utilizados y formando una plataforma integral (Yang et al., 2014). El concepto de datos vinculados, que a menudo se considera como parte de la web semántica, se ha explorado para conectar datos geoespaciales y otros datos relacionados, que no se vincularon previamente, utilizando Uniform Resource Identifier (URI) y Resource Description Framework (RDF), sobre la web (Bizer et al., 2009; Abbas y Ojo, 2013).

A pesar del rápido desarrollo de los servicios web geoespaciales, sigue habiendo una variedad de aspectos relacionados con los datos, la tecnología y los asuntos organizacionales, que desafían a los investigadores, desarrolladores, profesionales y usuarios públicos en este campo (Li et al., 2011). A medida que se accede a más y más datos geoespaciales en línea, en forma de servicios web, se ha generado una mayor demanda de servicios y datos de calidad, tanto para los proveedores como para los consumidores. Se necesitan medidas claras de calidad que ayuden a identificar, visualizar, evaluar y seleccionar información y servicios geoespaciales apropiados para aplicaciones dedicadas, a través de internet. En cuanto a la tecnología, los principales desafíos están relacionados con arquitecturas de datos y componentes distribuidos, apropiados y eficientes, falta de suficiente poder de geoprocesamiento, falta de aspectos semánticos de los servicios web, orquestación de servicios (selección de servicios, relación, interacción y composición), y gestión del rendimiento y equilibrio de carga de servicio dinámico. Además, se debe prestar más atención a algunos aspectos olvidados pero importantes, relacionados con la propiedad de los datos, derechos de autor y privacidad, políticas de uso de datos y servicios, y las implicaciones de la calidad de servicio y datos (Li y Yan, 2010; Blatt, 2014).

#### **1.1.4. Agenda de investigación científica**

En esta sección, se proporciona una visión sobre el desarrollo futuro de la información desde imágenes. Al hacerlo, se sigue la nueva estructura de comisiones de ISPRS, adoptada en 2015 para la implementación 2016 (figura 4), que comprende cinco comisiones:

- **Comisión I:** Sistemas de sensores.
- **Comisión II:** Fotogrametría.
- **Comisión III:** Percepción remota.
- **Comisión IV:** Ciencia de la información espacial.
- **Comisión V:** Educación y extensión.

Los desafíos de investigación de la Comisión V, que es una comisión no técnica, se analizarán más a fondo en la sección 1.1.5.

### 1.1.4.1. Sistemas de sensores

La Comisión I se preocupa del diseño, construcción, caracterización, calibración y uso de sensores de imágenes, sistemas y redes de sensores para fotogrametría, percepción remota y ciencia de la información espacial, tales como cámaras digitales aéreas y espaciales (escena y video) y escáneres láser, y sensores térmicos, hiperespectrales y de radar. Investiga las diferentes plataformas para la adquisición de datos incluidos, entre otros, UAS, sistemas móviles de mapeo, aeronaves, satélites, contenidos pequeños y constelaciones. La comisión también coopera con el sector industrial relacionado.



Figura 4: Temas de investigación de desafío para la ISPRS.

Fuente: Elaboración propia.

- a. **Sensores de imagen ópticos:** Se espera que los sensores de imagen sigan evolucionando a un ritmo acelerado en el futuro previsible. Los avances en las tecnologías CCD/CMOS se deben principalmente al gran mercado de consumo, donde los desarrollos del sistema de cámaras serán fuertes en los próximos años. El número de píxeles por adquisición de imágenes seguirá aumentando y se espera que los sistemas de cámaras con configuraciones de múltiple vista, que proporcionan simultáneamente imágenes adquiridas desde diferentes direcciones, aumenten rápidamente su cuota de mercado (Gruber y Walcher, 2014). Este desarrollo y el aumento esperado de los datos disponibles, enfatizan la necesidad de un procesamiento mejorado de big data y conceptos para la integración de datos. Si bien es probable que el rendimiento radiométrico de las cámaras mejore, la resolución espectral RGB y RGB-NIR típicas es poco probable que lo hagan a corto plazo (Honkavaara et al., 2009), aunque el interés en imágenes hiperespectrales desde el aire y el espacio está creciendo y estos datos pueden ser usados para generar escenas en 3D. Sin embargo, se necesita trabajar en la calibración y en el manejo de grandes volúmenes de datos. Además, existe un interés creciente en las imágenes térmicas. Para el trabajo terrestre, se usarán cada vez más sensores multicámara debido a sus ventajas en la captura de datos 3D, por ejemplo, para aplicaciones médicas. Se espera que la velocidad de adquisición de cuadros para capturar secuencias de imágenes experimente mejoras, lo que permite una mayor superposición de imágenes y una mejor observación del espacio de objetos desde el suelo, el aire y el espacio. Si se diseñan como cámaras PTZ (pan, tilt, zoom), estos sensores también se pueden usar para tareas de vigilancia y monitoreo, involucrando procesos

altamente dinámicos. Para tales procesos, la captura de datos 3D a partir de secuencias de imágenes necesita una sincronización de tiempo de alta precisión, lo que puede ser un problema. El límite entre los sensores de imágenes profesionales y de consumidores se verá aún más borroso. Un desafío radica en establecer y monitorear estándares para distinguir productos fotogramétricos de alta precisión de imágenes de tipo consumidor.

- b. **Imágenes 3D activas:** Las tecnologías de imagen activa en 3D, basadas en láser, son relativamente caras, pero han avanzado rápidamente a una tasa de desarrollo anual de 15% durante los últimos años (Hyypä et al., 2013). De este modo, proporcionan la base para desarrollos futuros significativos del sistema (Mallet y Bretar, 2009). Los sistemas LiDAR aerotransportados se están acercando a una frecuencia de pulso de 1 MHz, mientras los pulsos múltiples en el aire y los sistemas multisensor (sensores basados en láser múltiples), se desarrollan aún más en todas las plataformas (Nagai et al., 2009). El LiDAR móvil es actualmente el segmento de mayor crecimiento del mercado de adquisición directa de datos 3D, y es probable que la tendencia continúe por un tiempo. En particular, se esperan desarrollos rápidos en la categoría de gama baja. Las cámaras de tiempo de vuelo, que ofrecen una medición de profundidad para cada píxel simultáneamente, han aparecido en el mercado y se utilizan en interfaces hombre-máquina y juegos de video, para sistemas de asistencia al conductor y también para tareas de medición. Sin embargo, su potencial aún está en gran parte sin explotar. La tecnología Flash LiDAR ha alcanzado la madurez y está por ingresar a la producción convencional (Stettner, 2010). El mapeo de interiores probablemente sea la primera aplicación que se beneficiará de esta poderosa tecnología. Además, aunque los sistemas LiDAR de alta energía pulsada continuarán dominando el mercado, también se espera que los sistemas LiDAR de fotón único o Geiger-mode, alcancen el rendimiento necesario para aplicaciones comerciales (Abdullah, 2012). Por último, se están investigando activamente los sistemas LiDAR de longitud de onda múltiple, y es probable que se introduzcan ampliamente a medida que se desarrolle la demanda del mercado. Actualmente, los sistemas LiDAR de longitud de onda dual, verde y rojo, se utilizan cada vez más para el mapeo costero y batimétrico (Allouis et al., 2010; Niemeyer et al., 2014b), y los sistemas de longitudes de onda cuádruples han sido probados en aplicaciones forestales (Bo et al. 2011).
- c. **Sistemas SAR avanzados:** SAR ha hecho incursiones importantes en nuestro campo, en particular desde la disponibilidad de datos de alta resolución desde el espacio, por ejemplo Cosmo-SkyMed, TerraSAR-X y TanDEM-X (Eineder et al., 2009; Zink et al., 2014). Un desafío particular es volar estos satélites en una formación muy cercana. Otras innovaciones de sensores comprenden SAR bidireccional y multiestático, y SAR de formación de haz digital y superresolución; las imágenes de terahercios (THz) prometen mediciones de rango, extremadamente precisas. Las imágenes de una resolución geométrica en el rango dm desde los sistemas aéreos muestran un gran potencial, en particular cuando se usan en modo de multi-aspecto (Palm et al., 2015). También el radar terrestre está ganando importancia, por ejemplo, para tareas de geomonitoreo.
- d. **Plataformas nuevas y no convencionales:** En los últimos años se observó una tendencia clara a utilizar satélites pequeños (Sandau et al., 2011) y constelaciones de satélites, como RapidEye o Skybox, para diferentes tipos de aplicaciones. Una comparación de estos sistemas flexibles con sistemas más completos y parcialmente monolíticos, arrojará una visión interesante del potencial y las limitaciones de esta nueva tecnología para el mapeo y la percepción remota. Otro tipo de plataforma que se ha vuelto muy popular en los últimos años es UAS (Colomina y Molina, 2014; Pajeres, 2015). Para la comunidad geoespacial, el desafío es cómo lidiar con la mayor variación de movimiento de plataforma y el uso de sensores no métricos. Especialistas de disciplinas vecinas, en particular, han mostrado un gran interés en utilizar estos sistemas para aplicaciones que van desde la televisión hasta la seguridad nacional y la supervisión del tráfico. El boom inicial parece haber terminado, y ahora necesitamos evaluar sistemáticamente los méritos de estas plataformas y mejorarlas de acuerdo con las necesidades de la industria. También hay un movimiento para usar plataformas geoestacionarias con fines de mapeo (Joseph, 2015). Esto ofrece la posibilidad de una rápida revisita y adquisición de imágenes en tiempo real, a la vez que desafía a los desarrolladores de instrumentos a proporcionar un sensor que efectivamente genere imágenes de alta resolución desde la órbita terrestre alta.
- e. **Sensores para imágenes ubicuas:** En términos generales, la imagen es ubicua y, de hecho, está volviéndose omnipresente, en particular cuando se utiliza en redes de sensores, ya que un crecimiento exponencial del

número de sensores de imagen proporciona datos altamente redundantes a una resolución temporal creciente. Claramente, la redundancia está creciendo, puesto que múltiples sensores simultáneamente capturan el espacio de objeto y plataformas de sensores cooperativamente observan la misma zona (Hyde et al., 2006). La creciente variedad de plataformas, incluidos dispositivos inteligentes equipados con cámaras y GNSS, así como UAS, es otro aspecto clave que se debe tener en cuenta. Debido a la competitividad del mercado de consumo, la investigación y el desarrollo son muy fuertes en esta categoría y los avances se transfieren rápidamente al mercado profesional. Existen preocupaciones en esta área sobre cuestiones legales y de privacidad, y también en el establecimiento de normas que rigen la calidad de los productos.

En conclusión, se puede observar que los desarrollos en tecnología están produciendo nuevos sistemas de adquisición de datos y el desafío para la ISPRS es hacer coincidir esto con métodos científicos adecuados y herramientas para la evaluación, el procesamiento y el análisis.

#### 1.1.4.2. Fotogrametría

La Comisión II trata la teoría y la metodología para extraer y analizar información espacio-temporal de objetos desde imágenes terrestres, aéreas y satelitales, secuencias de imágenes y nubes de puntos, utilizando enfoques de fotogrametría, análisis de imágenes y visión artificial, con énfasis en la precisión y fiabilidad de la información geométrica. Las aplicaciones incluyen medición 3D basada en imágenes, en la adquisición de datos geoespaciales, el mapeo extraterrestre, ingeniería y metrología industrial, registro patrimonial, análisis forense, robótica, sistemas de asistencia al conductor, vigilancia, aplicaciones médicas, industria del cine y videojuegos, y otros campos.

- a. **Calibración y orientación rápida del sensor:** Como parte del procesamiento fotogramétrico, la modelación y calibración de sensores necesita más atención en las tareas de medición geométrica precisa, en metrología de imágenes, y para dispositivos de imágenes no convencionales como lentes de ojo de pez, panóptico y otras cámaras generalizadas. La orientación automática de la imagen (estimación de posición) se ha desarrollado con un cierto grado de madurez en la última década. Otras direcciones de investigación son, por un lado, la orientación simultánea de imágenes con perspectivas muy diferentes o de diferentes sensores, y la orientación desde una nueva fuente de datos relativa a imágenes ya orientadas o modelos 3D, como hitos visuales 3D generados a partir de imágenes. Por otro lado, soluciones incrementales para hacer frente a cantidades masivas de imágenes, soluciones basadas en la optimización convexa (Boyd y Vandenberghe, 2004) y la integración de diferentes sensores de imagen con información adicional sobre la posición y dirección de visualización (como la de GNSS e IMU), son temas cada vez más importantes.

En particular, en navegación, robótica y vigilancia se necesitan soluciones en tiempo real para procesar secuencias de imágenes; por ejemplo, para evitar obstáculos en sistemas autónomos de conducción y asistencia al conductor, para el seguimiento de peatones, y para SLAM. El enfoque debe estar en el desarrollo de algoritmos que sean escalables a través de muchas órdenes de magnitud, y que se puedan paralelizar fácilmente (Klingner et al., 2013).

- b. **Fusión de datos 3D múltiple:** Otro campo que ganará importancia es la fusión de múltiples datos complementarios para aplicaciones 3D. Los sistemas de adquisición recientemente desarrollados están integrando más y más sensores de imagen múltiples, además de los sensores LiDAR. Por ejemplo, un uso combinado de imágenes ópticas y LiDAR en el contexto de imágenes de visuales de calle (Paparoditis et al., 2012), tiene muchas ventajas para el procesamiento en 3D. Para dar otro ejemplo, nubes de puntos LiDAR con una densidad mucho menor (con respecto a las nubes de puntos 3D que se pueden generar a partir del procesamiento óptico) se pueden usar para identificar áreas focalizadas y reducir el esfuerzo combinatorio para el análisis de escenas, además de proporcionar una reconstrucción de superficie inicial para predecir las oclusiones y para normalizar la reconstrucción de nubes de puntos y mallas 3D, a partir de imágenes ópticas.

En una línea similar, el uso simultáneo de imágenes múltiples para la clasificación de imágenes, puede ayudar a superar los problemas de oclusión y obtener una clasificación de una escena completa (Roig et al., 2011). La disponibilidad de imágenes aéreas con altas superposiciones sin ningún costo adicional, junto con la tendencia

a obtener vistas aéreas oblicuas, pueden proporcionar antecedentes para hacer que tales aplicaciones también sean posibles para el caso aéreo.

- c. **Integración de calce, seguimiento y extracción de objetos:** La reconstrucción de objetos y superficies 3D a partir de imágenes y nubes de puntos ha alcanzado un estado alentador en la investigación, pero los problemas aún persisten, por ejemplo, en presencia de oclusiones múltiples, textura pobre y discontinuidades de profundidad significativas. Como consecuencia, aunque la detección de objetos en movimiento para sistemas de asistencia al conductor ha encontrado su camino en aplicaciones prácticas, podría decirse que aún no es robusta frente a condiciones desafiantes de imagen, tales como cambios bruscos de brillo, lluvia o nieve.

La integración del calce de imágenes, el seguimiento de patrones y la extracción de objetos en el mismo proceso, es una posible solución a estos problemas que debe explorarse más a fondo. En la actualidad, estas tareas generalmente se resuelven de manera independiente, de modo que los errores en la solución de una tarea se propagan a la siguiente; una solución simultánea puede ayudar a superar algunas de las limitaciones de los métodos actuales. Una primera solución para integrar el calce de imágenes y la clasificación ha sido desarrollada por Ladický et al. (2012), pero el problema aún requiere más esfuerzos de investigación. Otra extensión importante del calce denso es el flujo de escena dinámico, es decir, la estimación de campos de vector de profundidad y velocidad densos, coherentes espacialmente y temporalmente (Vogel et al., 2013; Menze y Geiger, 2015), que también se pueden usar para identificar objetos individuales (movimiento) (Menze et al., 2015).

- d. **Comprensión estadística de la escena:** Gran parte del trabajo actual sobre comprensión robusta de escenas mediante clasificación y seguimiento de imágenes, se basa en una formulación de problemas estadístico, en muchos casos, en un entorno supervisado para hacer que las respectivas aplicaciones se adapten más fácilmente a diferentes escenas. Los modelos gráficos han demostrado proporcionar un marco flexible muy adecuado para resolver estos problemas. Los clasificadores basados en modelos gráficos, tal como los campos aleatorios condicionales (CRF), se entienden bastante bien hoy en día y deberían convertirse en el método de elección para las tareas de clasificación (Schindler, 2012). Sin embargo, la provisión de datos de entrenamiento es un factor limitante para aplicaciones prácticas, en particular si modelos de contexto sofisticados se van a aprender en la capacitación. Este problema se puede superar adaptando las técnicas para aprendizaje de transferencia (Pan y Yang, 2010) a problemas de clasificación de imágenes. El aprendizaje de transferencia puede ayudar a adaptar un clasificador entrenado en un conjunto de imágenes, a otro conjunto de datos con diferentes distribuciones subyacentes; o puede ayudar a resolver tareas nuevas basadas en la solución existente de una tarea similar. Ambos tipos de aprendizaje de transferencia deberían encontrar su camino en fotogrametría y percepción remota. Otra posibilidad de hacer frente a muy pocos datos de capacitación, en particular para aplicaciones de mapeo, es el uso de información de bases de datos potencialmente desactualizadas. El desafío es lidiar con información parcialmente incorrecta. Este aspecto se refiere al problema del ruido de etiqueta (Frénay y Verleysen, 2014).

Para muchas aplicaciones, también es importante que los algoritmos lleguen a saber dónde fallan para, por un lado, pilotar un operador y controlar –y potencialmente editar y corregir– el error o, por otro lado, para cambiar a un algoritmo alternativo (Paparoditis et al., 2007). Las posibilidades de autodiagnóstico basadas en medidas de calidad fiables (Boudet et al., 2006) son necesarias para lograr medidas de integridad como las que se utilizan en la industria aeronáutica.

- e. **Modelado del conocimiento de escenas de alto nivel:** La incorporación del conocimiento de escenas de alto nivel para la detección de objetos y la comprensión de escenas, es una de las direcciones más importantes de investigación. CRF y los modelos relacionados funcionan bien a nivel local, combinando la clasificación de píxeles vecinos de una imagen. Como se señaló en la sección sobre el estado del arte, hay una variedad de estrategias para abordar este problema. No todos se pueden transferir fácilmente a imágenes aéreas y de satélite, y aún no está del todo claro cuál es la mejor estrategia a seguir cuando se trata de abordar este problema. Ejemplos a considerar del conocimiento de alto nivel incluyen el uso de múltiples capas de etiquetas de objeto, así como de modelos basados en partes, la definición de camarillas de alto orden que combinan las etiquetas de

múltiples píxeles, el uso de modelos jerárquicos teniendo en cuenta etiquetas de clase a diferentes escalas, y otras formas de considerar las interacciones de largo alcance, como los antecedentes relativos de ubicación (Gould et al., 2008). Algunas de estas técnicas implican un procedimiento de etapas múltiples en el que interactúan la clasificación a nivel local y los procedimientos de alto nivel. Los procesos de puntos marcados (MPP, Lafarge et al., 2008) y particularmente los MPP multi-objeto, son otra posibilidad prometedora para integrar el conocimiento de escena de alto nivel; estos podrían tener éxito donde los sistemas expertos fallaron en la década de los 80. Una perspectiva interesante y desafiante podría ser también unificar los MPP y los modelos gráficos en el mismo marco para obtener ventajas complementarias. La forma óptima de considerar el conocimiento de alto nivel, así como la mejor forma de integrar múltiples etapas de procesamiento en este contexto, aún debe ser investigada. Esto proporciona un campo de investigación bastante amplio que debe ser abordado por la comunidad científica.

- f. **Representación basada en imágenes:** Esto consiste en navegar continuamente en 3D para un mayor nivel de inmersión, entre las imágenes orientadas más cercanas, pandeando y combinando estas imágenes en un modelo 3D (ya existente o generado fuera de línea o sobre la marcha desde las imágenes), para generar una representación sintética pero realista de cualquier vista, evitando así la necesidad de texturizar los modelos 3D antes de la navegación, lo cual no es un problema bien planteado. Esto evitaría, por ejemplo, la necesidad de generar ortofotos fuera de línea, y conduciría a la generación de ortofotos sobre la marcha. Algunos problemas de investigación abierta son la consideración y gestión de la incertidumbre de las orientaciones de la imagen y el modelo 3D en el proceso de renderizado y la ecualización radiométrica de las imágenes (física, empírica, o intermedias), antes de la mezcla de texturas.
- g. **Comparadores (Benchmarking):** Por último, pero no menos importante, la comunidad ISPRS debe aumentar sus esfuerzos para proporcionar puntos de referencia para tareas específicas (Rottensteiner et al., 2014; Nex et al., 2015; Vallet et al., 2015). Mientras que las bases de referencia de la comunidad de visión artificial y robótica pueden ser suficientes en muchos casos, hay algunas aplicaciones que no cubren, en particular aquellas que requieren vistas casi verticales. Puede ser difícil superar los derechos de autor y los aspectos de seguridad, pero proporcionar un banco de pruebas común para los nuevos algoritmos es, sin embargo, importante para comparar enfoques diferentes y poder identificar estrategias prometedoras frente a aquellas que son menos prometedoras. Como consecuencia, la evaluación comparativa puede acelerar considerablemente el progreso de la investigación.

### 1.1.4.3. Percepción remota

La Comisión III se ocupa de la investigación, el desarrollo, el uso operacional e investigativo de métodos y sistemas para el análisis de observaciones de la Tierra obtenidas remotamente desde sensores aéreos y espaciales, en sinergia con mediciones in situ y portátiles. Los ejemplos incluyen el modelado físico de radiación electromagnética, el análisis de firmas espectrales, la clasificación de imágenes, la fusión de datos y el reconocimiento de patrones. Las aplicaciones tratadas en la Comisión III incluyen el monitoreo ambiental para el desarrollo sostenible y el cambio global; el mapeo de actividades humanas y naturales, incluyendo uso y cobertura del suelo, y la biodiversidad; procesos de monitoreo basados en evidencia física y empírica; evaluación y mitigación de desastres; identificación y evaluación de recursos renovables y no renovables; y el monitoreo de cambios temporales en el clima y en la cubierta terrestre y marina.

- a. **Modelado de firma espectral:** Un elemento clave en percepción remota sigue siendo el modelado físico de las ondas electromagnéticas y su interacción con la atmósfera, así como con superficies y objetos retratados. Con el creciente número de bandas espectrales disponibles en muchos sensores satelitales (por ejemplo, WorldView-3 con un total de 28 bandas, y en particular las misiones hiperespectrales como la alemana ENMAP con más de 240 bandas), el modelado de las firmas espectrales de diferentes materiales alcanza un mayor nivel de complejidad y comprende muchos desafíos nuevos.
- b. **Procesamiento de SAR de alta resolución:** La detección remota de SAR (radar de apertura sintética) jugará un papel importante en futuras aplicaciones de percepción remota. El hecho de que el radar sea un sistema activo y pueda penetrar las nubes lo convierte en una herramienta muy útil para las tareas de monitoreo continuo

en la observación de la Tierra. Los desafíos específicos de la investigación radican en imágenes de alta resolución en tres dimensiones, posiblemente a través de tomografías SAR, combinadas con detección compresiva (Zhu y Bamler, 2012). También el SAR polarimétrico y simplificaciones de SAR tomográfico, tales como InSAR/IFSAR y la interferometría de dispersión permanente (PSI), todavía proporcionan muchos desafíos sin resolver, en particular cuando se emplean con las ahora disponibles pilas de imágenes SAR de alta resolución y los datos SAR multiaspecto. La interferometría en modo de seguimiento proporciona posibilidades para monitorear objetos dinámicos, por ejemplo, en el monitoreo del tráfico de buques, la medición de las corrientes oceánicas y el monitoreo de icebergs. Otra área de mayor interés es la fusión de datos ópticos y de SAR, ya que en muchos casos estas dos fuentes de datos son complementarias.

- c. **Procesamiento de imágenes hiperespectrales:** La interpretación de imágenes satelitales de forma automática, utiliza la clasificación de imagen y los enfoques de análisis de imágenes (ver las discusiones en la sección 1.1.4.2). Las imágenes hiperespectrales ofrecen un desafío adicional, ya que a menudo es necesaria una selección adecuada de bandas y una definición de características, para poder manejar grandes cantidades de datos y escapar de la maldición de la dimensionalidad (Hughes, 1968), que puede surgir fácilmente debido a una falta de suficientes datos de entrenamiento. Otro tema de investigación importante es la elaboración de métodos de clasificación que solo requieren un mínimo de mediciones in situ, difíciles y costosas de recoger.
- d. **Procesamiento de imagen multitemporal:** Constelaciones de satélites como RapidEye, con cinco satélites, y más aún, el sistema Skybox, que es capaz de capturar videos de alta resolución desde el espacio y que está planeado para tener 24 satélites en su constelación final, entregan una mayor cantidad de observaciones repetidas que pueden ser utilizadas en el procesamiento multitemporal para modelar procesos dinámicos, por ejemplo, patrones de crecimiento de plantas en la agricultura. Obviamente, para áreas más pequeñas, tales series de tiempo también se pueden adquirir usando UAS de ala fija y a la rotativa. Al explotar tales series de tiempo, las imágenes desempeñarán el papel de una instantánea, documentando un estado específico de los procesos subyacentes observados que inducen el cambio. Aunque estos procesos pueden ser naturales (por ejemplo, geocientíficos y biológicos) o antropogénicos (es decir, hechos por el hombre), el énfasis estará en estimar los parámetros que rigen los procesos para una mejor comprensión y poder predictivo. Obviamente, tales estudios requieren un enfoque interdisciplinario.
- e. **Procesamiento de big data de observación de la Tierra:** Los volúmenes de datos adquiridos actualmente por los sistemas de percepción remota desde el espacio, y también desde el aire, y mediante sistemas de mapeo móvil basados en terreno, presentan un desafío no solo en términos de almacenamiento y preprocesamiento de las imágenes, sino también en términos de extracción de información (especialmente en 3D) y minería de información (Quartulli y Olaizola, 2013). Por lo tanto, este tema también se relaciona con las otras comisiones ISPRS. El nuevo paradigma es extraer por completo, de noche, la información de datos que tradicionalmente se han adquirido solo durante el día. Las nuevas tecnologías para el procesamiento de big data como Hadoop y MapReduce en la nube o en soluciones computacionales de alto rendimiento (HPC), deberían investigarse y aplicarse ventajosamente a tales imágenes (Nativi et al., 2015). Además, el preprocesamiento factorizado de los datos para extraer características 2D o 3D de bajo o mediano nivel, es necesario para evitar el procesamiento redundante y simplificar la explotación de datos.

#### 1.1.4.4. Ciencia de la información espacial

La Comisión IV trata aspectos teóricos y prácticos de la modelización, la gestión, el análisis, la difusión y la visualización de datos geoespaciales, incluida la interoperabilidad, los servicios web y la infraestructura de datos geoespaciales. También se ocupa de las aplicaciones y el uso operativo de información espacio-temporal, en áreas como transporte, monitoreo ambiental, gestión de desastres, movilidad, modelos 3D de ciudades, Building Information Systems (BIM), redes sociales, servicios basados en la ubicación y salud.

- a. **Manejo de grandes datos geoespaciales vinculados:** Grandes datos geoespaciales vinculados, obtenidos a través de la combinación de tecnología de datos enlazados con big data geoespacial, se refieren a la construcción y publicación de datos geoespaciales de alto volumen, estructurados y no estructurados, para permitir consultas

semánticas más útiles y permitir una mejor reutilización de conocimientos integrados en diferentes fuentes de datos (Kuhn et al., 2014; Lee y Kang, 2015). Es necesario explorar una serie de aspectos, como la agregación semántica y la publicación de grandes cantidades de datos espaciales con datos de dominio y de redes sociales, la recuperación y exploración de datos espaciotemporales vinculados, el desarrollo de herramientas innovadoras y capaces de procesar datos geoespaciales (grandes o vinculados), la conexión y publicación de big data geoespacial y la minería y visualización de big data geoespacial vinculado, así como su aplicación en navegación, salud pública, gestión urbana, monitoreo ambiental, y en otras áreas de beneficio social.

- b. **Ciencia geoespacial abierta:** Con los significativos incrementos en los datos geoespaciales abiertos, el rápido avance del software libre y de código abierto para geoinformación (FOSS4G) y el acceso abierto a artículos de investigación, se verá un desarrollo dramático en la ciencia geoespacial abierta o libre (Steiniger y Hunter, 2013; Jeffery et al., 2014; Simón et al., 2014; Harris y Baumann, 2015; Swain et al., 2015). Promoverá la colaboración a gran escala de científicos y ciudadanos en diversas etapas de la información, desde el proceso de captura de imágenes, incluyendo el intercambio de datos, la reutilización de códigos de software, la reproducibilidad de la ciencia y el procesamiento y validación colaborativo. Los temas de investigación críticos incluyen estándares de datos abiertos, evaluación de calidad y control de datos abiertos, interoperabilidad semántica, VGI, arquitecturas y marcos de trabajo para software de fuente abierta, conceptualización y creación de software de fuente abierta, interfaces de computadora humana y usabilidad en y alrededor de sistemas de IG abiertos, la combinación e integración de software y datos geoespaciales de código abierto, un análisis de costo y beneficio de aplicaciones de código abierto, y modelos de negocio de código abierto.
- c. **Modelado de datos n-dimensionales múltiple escala:** Incluso después de veinte años de investigación, todavía hay una falta de enfoques bien establecidos para el modelado sofisticado de grandes cantidades de datos multidimensionales, fenómenos multiescala y estructuras hechas por el hombre, incluidos sus cambios temporales (Craglia et al., 2012; Long y Li, 2013; Xiong et al., 2015). Todavía quedan por resolver varios problemas para desarrollar nuevas metodologías, algoritmos y aplicaciones relacionadas con la representación de datos espaciales n-dimensionales en escalas múltiples. Ejemplos típicos son (a) la representación y el cálculo de relaciones 3D y temporales, y ontologías espacio-temporales, así como su uso para representar fenómenos geográficos y ambientales en 3D y a mayor dimensión, (b) estructuras de datos espaciales e indexación espacial para modelos multi-dimensionales, (c) generalización automatizada de datos multidimensionales de diferentes niveles de detalle para varios propósitos, y (d) juegos completos de algoritmos atómicos para modelado multidimensional.
- d. **Algoritmos geoespaciales avanzados:** Cada vez hay más conjuntos de datos espaciales disponibles que deben analizarse y combinarse de forma inteligente. Para hacerlo, se necesitan métodos de interpretación que puedan encontrar información de mayor nivel en los geodatos estructurados proporcionados. Con este fin, se pueden aplicar técnicas similares como las usadas en el análisis de imágenes, la minería de datos (espaciales) y los métodos de aprendizaje automático, que son técnicas muy potentes (Miller y Han, 2009). Como los datos son adquiridos por varios sensores, es obvio que también se pueden procesar por separado, es decir, de forma descentralizada. Esto tiene varios beneficios, por ejemplo, procesamiento en paralelo, computación local con ventajas con respecto a la privacidad de datos, así como una reducción en la comunicación de datos (Duckham, 2012). Finalmente, se necesitan métodos y modelos que puedan actualizar y refinar incrementalmente conjuntos de datos geoespaciales y permitir explícitamente que las descripciones tengan diferentes estados: por ejemplo, partes del objeto pueden ser completamente capturadas, otras partes solo groseramente o no ser en absoluto. Entonces, aún debe ser posible almacenar la información (preliminar), marcarla como tal, y refinarla y completarla incrementalmente en una etapa posterior.
- e. **Representación visual dinámica y multidimensional:** La geovisualización mantendrá un fuerte vínculo con el big data geoespacial y los datos 3D. La visualización de la movilidad y la dinámica en entornos urbanos continuará llamando la atención. El análisis visual permite la inspección visual interactiva de datos potencialmente grandes y de gran dimensión (Andrienko y Andrienko, 2013). La visualización para la navegación interior 3D y la infraestructura subterránea están ganando terreno. El zoom continuo se convertirá en una función crítica para los sistemas de análisis digital desde tierra y espaciales. Los problemas teóricos

incluyen la percepción por el cerebro humano de las estructuras de representaciones visual, los principios de diseño de mapas y otras representaciones visuales, y la usabilidad de la representación visual. Basándose en información métrica, temática y topológica (Li y Huang, 2002), la teoría de la información se utilizará ampliamente como base teórica para el diseño eficaz de sistemas de transmisión de información y para la evaluación de representaciones visuales. Como la usabilidad de los mapas será más enfatizada por los usuarios en el futuro, particularmente por el público en general, las representaciones similares a mapas, como los mapas esquemáticos, mapas de escala variable y otros mapas personalizados, serán cada vez más populares.

- f. **Mapeo y monitoreo global:** Con el acceso abierto a conjuntos de datos globales, se dedicarán más esfuerzos a su validación, actualización y aplicación (Li et al., 2011; Giri et al., 2013; Chen et al., 2015; Ban et al., 2015). Es necesario desarrollar especificaciones técnicas acordadas internacionalmente, que definan la estrategia general, el muestreo y los enfoques para la evaluación de la calidad, y establecer una plataforma de validación basada en la web correspondiente. Todavía se deben desarrollar enfoques de actualización operativos para la generación de productos más actuales y conjuntos de datos de series de tiempo a través de una combinación de detección de cambio robusta, crowdsourcing de ciudadanos y recopilación de datos auxiliares. Habrá que establecer varias redes dinámicas de monitoreo a escala local, regional, nacional y continental, para la entrega oportuna de los cambios en la cobertura terrestre y otros hechos, variables esenciales y tendencias relevantes para los responsables de la toma de decisiones y los usuarios relevantes. Para integrar el monitoreo y análisis a escala fina con cobertura global, es esencial integrar o conectar todas las fuentes de información existentes en una variedad de escalas espaciales, distribuidas localmente a nivel mundial, para formar portales de conocimiento ampliamente accesibles y para proporcionar un servicio de información one-stop para cobertura de suelo, nieve y hielo, y otra información relacionada con la Tierra. Como resultado, la actualización incremental y el refinamiento seguirán siendo un tema que merece atención de investigación. También es fundamental incorporar conocimiento y principios específicos de dominio en el proceso de monitoreo, para comprender las razones y las consecuencias de los cambios observados y predecir las tendencias futuras.
- g. **Servicios geoespaciales dinámicos:** Los avances recientes en redes de ciber-infraestructura y tecnologías de comunicaciones, especialmente las tecnologías más recientes de computación en la nube, han creado un gran potencial para servicios basados en la web y la demanda de nuevos tipos de servicios, para diseminar información espacial y acceder a infraestructuras de computación escaladas masivamente, y para nuevos servicios web y en la nube para el procesamiento en línea de problemas de uso intensivo de datos de información geoespacial espacio-temporal, estática y dinámica. La rápida transición de la web 2.0 a la web 3.0 cambia la web desde creación de contenido y participación a significado y conocimiento conectado, lo que requiere una web semántica en lugar de una que solo sea interactiva. La web 3.0 requiere una web inteligente con conjuntos de datos geoespaciales vinculados para un descubrimiento, análisis, automatización, integración, reutilización y visualización, de información geoespacial, más efectivos en varias aplicaciones. Se necesitan nuevos estándares y especificaciones de interoperabilidad para servicios, arquitecturas de sistemas e información geoespacial, procesos y flujos de trabajo. Las investigaciones futuras se centrarán más en la recuperación inteligente y el procesamiento de recursos informáticos distribuidos, en la procedencia y los metadatos de métodos analíticos espaciales, y en la computación grid y en la nube, para una red geoespacial funcionalmente rica y colaborativa, basada en servicios geoespaciales (Li, 2008; Li et al., 2011; Evangelidis et al., 2014). Esto nos moverá hacia la web como una plataforma que proporciona capacidades GIS tradicionales de una manera no tradicional.

### 1.1.5. Conclusiones

Como sociedad preocupada por la información desde imágenes, la ISPRS se enfrenta a desafíos científicos importantes, con algunas de sus subdisciplinas evolucionando gradualmente y algunas avanzando un ritmo muy rápido. Las principales tendencias se pueden resumir de la siguiente manera:

- **Adquisición de imágenes:** El modelo de sensores integrados ha reemplazado el modelo tradicional de un solo sensor de imagen. Las nuevas fuentes de datos como Urthcast y las cámaras en UAS, son ampliamente utilizadas y plantean problemas de calibración y calidad de datos. La percepción ubicua y la participación pública están

ganando peso, lo que lleva a la percepción ciudadana o la percepción participativa. Si bien este desarrollo abre muchas aplicaciones nuevas, por ejemplo, en la actualización y el monitoreo de desastres, los científicos tienen el desafío de garantizar aspectos de calidad de datos, confiabilidad y privacidad de los mismos.

- **Constelación de satélites:** En un futuro cercano, las constelaciones que comprenden satélites múltiples, proporcionarán imágenes de alta resolución hasta varias veces al día, en cada rincón del planeta, casi en tiempo real. Así será posible monitorear procesos dinámicos en la superficie de la Tierra. Los desafíos comprenden el procesamiento de datos multitemporales y el modelado de los procesos dinámicos, así como la minería de información y de procesamiento de datos multitemporales.
- **Extracción de información:** La integración del calce de imágenes, el seguimiento y la extracción de objetos, está reemplazando al modelo tradicional de procesamiento independiente de objetos individuales. Las soluciones escalables en tiempo real se volverán cada vez más importantes, mientras que la alta precisión geométrica, junto con el mayor grado de automatización, sigue siendo un requisito y un desafío central, en particular en la metrología industrial. El uso de imágenes múltiples promete ofrecer una solución para la clasificación de imágenes y la reconstrucción de objetos, de manera de superar el problema de la oclusión. El monitoreo de grandes áreas se está moviendo desde la configuración experimental basada en la investigación, a los procedimientos operativos.
- **Modelado de datos:** El modelado y la comprensión del mundo real y de las comunidades en línea, y su interacción, se están volviendo cruciales para el emergente mundo ciberfísico convergente (CPW). Las estructuras de datos espaciales tienden a moverse desde tres a cuatro dimensiones (3D más tiempo). La infraestructura de datos espaciales será un marco dinámico para compartir información globalmente, para incluir tanto entornos interiores como exteriores, y para navegar por espacio y tiempo.
- **Servicios geoespaciales:** Las preocupaciones clave se han desplazado desde la provisión de información a la entrega de conocimiento geoespacial, desde el mapeo aleatorio hasta el monitoreo dinámico y la predicción de las tendencias futuras, y desde las soluciones de escritorio tradicionales a las plataformas en la nube mediante servicios web. El big data geoespacial llegó para quedarse y exige un nuevo examen de lo que la teoría geoespacial, métodos y sistemas de aplicación existentes son capaces de manejar. Existe un inmenso desafío para proporcionar infraestructuras de datos espaciales y servicios relacionados que sean sólidos y puedan satisfacer la necesidad de proporcionar información a los responsables de la toma de decisiones, de una manera que sea útil, comprensible y fácil de usar.
- **Interacción disciplinaria:** La separación entre fotogrametría de corto alcance y aérea, se ha vuelto cada vez más borrosa. La percepción remota y la ciencia de la información espacial están más estrechamente integradas en muchos sistemas operativos, y más conocimientos y principios específicos de dominio se incorporarán en el procesamiento y análisis de datos geoespaciales tradicionales de geometría dominante.

Este documento ha identificado y discutido temas de investigación para que la comunidad ISPRS aborde en el futuro. Nuestro objetivo principal ha sido llamar y movilizar a todos los científicos, profesionales y partes interesadas de la ISPRS a continuar mejorando nuestra comprensión y capacidad relacionadas con la generación de información desde imágenes, y a proporcionar conocimiento geoespacial que permita a la humanidad enfrentar los desafíos que se avecinan, por ejemplo, por cambio global, la detección ubicua y la demanda de información en tiempo real. La implementación de esta visión científica y agenda de investigación de la ISPRS, requiere de más educación y de un esfuerzo mayor, así como también colaboración internacional e interdisciplinaria. Necesitamos promover el uso de imágenes en otras profesiones, atraer a científicos y profesionales jóvenes, involucrar a una nueva generación de investigadores y usuarios, educar a nuestros socios sobre nuestras fortalezas, y desarrollar alianzas internacionales innovadoras entre investigadores y agencias operativas. Aquí es donde la Comisión V de la ISPRS sobre educación y extensión desempeñará un papel central. La Comisión V se ocupa de la educación, capacitación, creación de capacidades y la divulgación en todas las áreas relacionadas con la ISPRS. También es la comisión de origen del Consorcio Estudiantil ISPRS.

Algunos de los desarrollos científicos y desafíos discutidos también plantean problemas legales y políticos. Por ejemplo, el uso de UAS plantea problemas relacionados con la seguridad y la privacidad. Los datos satelitales de alta resolución también generan preocupaciones sobre la privacidad y la seguridad nacional, al igual que las cámaras de vigilancia combinadas con algoritmos de rastreo. Otro tema importante de política es el acceso a datos y software, y si los datos y herramientas recopilados y desarrollados con el dinero de los contribuyentes deberían ser gratuitos. Estos problemas deben continuar siendo abordados en el futuro y la ISPRS puede desempeñar un rol importante en tales discusiones. Con esta visión científica general y la nueva estructura de la comisión, la ISPRS está bien posicionada como una organización científica relevante, dinámica y con visión de futuro, dedicada a obtener y utilizar información desde imágenes en el siglo XXI.

#### **1.1.6. Agradecimientos**

Los autores desean agradecer al primer vicepresidente de la ISPRS Orhan Altan, a la directora del congreso Lena Halounová, al presidente del IPAC Gunter Schreier y al profesor Wenzhong Shi (Universidad Politécnica de Hong Kong), al profesor Stephan Winter (Universidad de Melbourne), por sus contribuciones al presente capítulo. También agradecemos a los miembros honorarios de la ISPRS, a los miembros regulares, a los presidentes de las comisiones técnicas, y a otros oficiales de la ISPRS, por sus valiosos comentarios y sugerencias. Finalmente, los autores agradecen a Christine Jeans de la Universidad de Newcastle por su ayuda en la preparación de las figuras.

## Referencias bibliográficas

- Abbas, S.; Ojo, A. "Towards a Linked Geospatial Data Infrastructure. Technology-Enabled Innovation for Democracy, Government and Governance". LNCS (8061): 196-210. 2013.
- Abdullah, Q. A. "Mapping Matters". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78(7): 664-665. 2012.
- Abraham S.; Förstner, W. "Fish-eye-stereo calibration and epipolar rectification". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 59(5): 278-288. 2005.
- Addo, K.A.; Walkden, M.; Mills, J.P. "Detection, measurement and prediction of coastal recession in Accra, Ghana". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(5): 543-558. 2008.
- Allouis, T.; Bailly, J. S.; Pastol, Y.; Le Roux, C. "Comparison of LiDAR waveform processing methods for very shallow water bathymetry using Raman, near infrared and green signals". *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(6): 640- 650. 2010.
- Altan, O.; Backhaus, R.; Boccardo, P.; Zlatanova, S. "Best practices in disaster management". *Geospatial TODAY* (12): 36-40. 2012.
- Andrienko, G.; Fabrikant, S.; Griffin, A.; Dykes, J.; Schiewe, J. "GeoViz: interactive maps that help people think". *International Journal of Geographical Information Science*, 28(10): 2009-2012. 2014.
- Andrienko, N.; Andrienko, G. "Visual analytics of movement: An overview of methods, tools and procedures". *Information Visualization*, 12(1): 3-24. 2013.
- Ban, Y. F.; Gong, P.; Giri C. "Global land cover mapping using Earth observation satellite data: recent progresses and challenges". Editorial, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 1-6. 2015.
- Bay, H.; Ess, A.; Tuytelaars, T.; Van Gool, L. "SURF: Speeded Up Robust Features". *Computer Vision and Image Understanding*, 110(3): 346-359. 2008.
- Belgiu, M.; Dragut, L.; Strobl, J. "Quantitative evaluation of variations in rule-based classifications of land cover in urban neighbourhoods using WorldView-2 imagery". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87: 205-215. 2014.
- Benedek, C.; Shadaydeh, M.; Kato, Z.; Szirányi, T.; Zerubia, J. "Multilayer Markov Random Field models for change detection in optical remote sensing images". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 107(9): 22-37. 2015.
- Benz, S.; Weibel, R. "Road network selection for medium scales using an extended stroke-mesh combination algorithm". *Cartography and Geographic Information Science*, 41(4): 323-339. 2014.
- Bereuter, P.; Weibel, R. "Real-time generalization of point data in mobile and web mapping using quadtrees". *Cartography and Geographic Information Science*, 40(4): 271-281. 2013.
- Besl, P.; McKay, N. "A method for registration of 3-D shapes". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 14 (2): 239-256. 1992.
- Bey, A.; Sánchez-Paus Díaz, A.; Maniatis, D.; Marchi, G.; Mollicone, D.; Ricci, S.; Miceli, G. "Collect Earth: Land Use and Land Cover Assessment through Augmented Visual Interpretation". *Remote Sensing*, 8(10): 807. 2016.
- Bizer, C.; Heath, T.; Berners-Lee, T. "Linked data - the story so far". *International Journal on Semantic Web and Information Systems*, 5(3): 1-22. 2009.
- Bjørke, J. "Exploration of information theoretic arguments for the limited amount of information in a map, theories of map design in the digital era". *Cartography and Geographic Information Science*, 39(2): 88-97. 2012.
- Blatt, A. J. "Data privacy and ethical uses of volunteered geographic information". *Geotechnologies and the Environment*, (12): 49-59. 2014.
- Bleisch, S.; Duckham, M.; Galton, A.; Laube, P.; Lyon, J. "Mining candidate causal relationships in movement patterns". *International Journal of Geographical Information Science*, 28(2): 363-382. 2014.
- Bo, Z.; Wei, G.; Shuo, S.; Shalei, S. "A multi-wavelength canopy LiDAR for vegetation monitoring: system implementation and laboratory-based tests". *Procedia Environmental Sciences*, (10): 2775-2782. 2011.
- Boudet, L.; Paparoditis, N.; Jung, F., Martinoty, G.; Pierrrot-Deseilligny, M. "A supervised classification approach towards quality self-diagnosis of 3D building models using digital aerial imagery". *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI-3: 136-141. 2006.
- Boyd, S. P.; Vandenberghe, L. "Convex optimization". Cambridge University Press. 2004.
- Brédif, M. "Modélisation 3D de bâtiments: Reconstruction automatique de superstructures de toits et recalage cinétique de toits polyédriques prenant en compte la topologie". Thèse de doctorat de Télécom ParisTech. 2010.

- Brédif, M.; Tournaire, O.; Vallet, B.; Champion, N. "Extracting polygonal building footprints from digital surface models: A fully-automatic global optimization framework". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77: 57-65. 2013.
- Breitenstein, M. D.; Reichlin, F.; Leibe, B.; Koller-Meier, E.; Van Gool, L. "Online multiperson tracking-by-detection from a single, uncalibrated camera". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 33(9): 1820-1833. 2011.
- Brenner, C.; Dold C.; Ripperda, N. "Coarse orientation of terrestrial laser scans in urban environments". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(1): 4-18. 2008.
- Bryan, B. "High-performance computing tools for the integrated assessment and modelling of social ecological systems". *Environmental Modeling & Software*, 39: 295-303. 2013.
- Buchin, K.; Van Goethem, A.; Hoffmann, M.; Van Kreveld, M.; Speckmann, B. "Travel-time maps: linear cartograms with fixed vertex locations". In: Duckham M., Pebesma E., Stewart K., Frank A. (eds.), *GI Science (LNCS 8728)*, Springer, Berlin, 18-33. 2014.
- Budimir, M. E. A.; Atkinson, P. M.; Lewis, H. G. "A systematic review of landslide probability mapping using logistic regression". *Landslides*, 12(3): 419-436. 2015.
- Bulatov, D.; Wernerus, P.; Heipke, C. "Multi view dense matching supported by triangular meses". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66(6): 907-918. 2011.
- Cao, C.; Sun, Y. "Automatic road centerline extraction from imagery using road GPS data". *Remote Sensing*, (6): 9014-9033. 2014.
- Chan, J.; Paelinckx, D. "Evaluation of random forest and adaboost tree-based ensemble classification and spectral band selection for ecotope mapping using airborne hyperspectral imagery". *Remote Sensing of Environment* 112(6): 2999-3011. 2008.
- Chen, J.; Ban, Y.; Li, S. "China: Open access to Earth land-cover map". *Nature*, 514(434): 23. 2014a.
- Chen, J.; Chen, J.; Cao, X.; Liao, A.; Cao, X.; Chen, L.; Chen, X.; He, C.; Han, G.; Peng, S.; Lu, M.; Zhang, W.; Tong, X.; Mills, J. "Global land cover mapping at 30m resolution: a POK-based operational approach". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 7-27. 2015.
- Chen, J.; Lu, M.; Chen, X.; Chen, J.; Chen, L. "A spectral gradient difference based approach for land cover change detection". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 85: 1-12. 2013a.
- Chen, J.; Wang, D.; Zhao, R.; Zhang, H.; Liao, A.; Liu, J. "Fast updating of national geo-spatial databases with high resolution imagery: China's methodology and experiences". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-4: 41- 50. 2014b.
- Chen, J.; Wu, H.; Li, S.; Liao, A.; He, C.; Cheng, D. "Temporal logic and operation relations based knowledge representation for land cover change web service". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83: 140-150. 2013b.
- Chen, X.; Chen, J.; Shi, Y.; Yamaguchi, Y. "An automated approach for updating land cover maps based on integrated change detection and classification methods". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71: 86-95. 2012.
- Chen, X.; Li, Y.; Su, Y.; Han, L.; Liao, J.; Yang, S. "Mapping global surface roughness using AMSR-E passive microwave remote sensing". *Geoderma* 235-236: 308-315. 2014c.
- Clementini, E. "Directional relations and frames of reference". *GeoInformatica*, 17(2): 235-255. 2013.
- Colomina, I.; Molina, P. "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92: 79-97. 2014.
- Conti, M.; Das, S.; Bisdikian, C.; Kumar, M.; Ni, L.; Passarella, A.; Roussos, G.; Troster, G.; Tsudik, G.; Zambonelli, F. "Looking ahead in pervasive computing: Challenges and opportunities in the era of cyber-physical convergence". *Pervasive and Mobile Computing* 8: 2-21. 2012.
- Craglia, M.; De Bie, K.; Jackson, D.; Pesaresi, M.; Remetej-Fülöpp, G.; Wang, C.; Annoni, A.; Bian, L.; Campbell, F.; Ehlers, M.; Van Genderen, J.; Goodchild, M.; Guo, H.; Lewis, A.; Simpson, R.; Skidmore, A.; Woodgate, P. "Digital Earth 2020: towards the vision for the next decade". *International Journal of Digital Earth*, 5(1): 4-21. 2012.
- Cramer, M. "Digital camera calibration". *EuroSDR, Publication No 55*, 262 pages. 2011.
- Cramer, M. "The UAV@LGL BW Project-A NMCA case study". In: Fritsch D. (ed.), *Photogrammetric Week*. Wichmann, Heidelberg: 151-163. 2013.
- Cura, R.; Perret, J.; Paparoditis, N. "Streetgen: in-base procedural-based street generation". *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-3/W5: 409-416. 2015.

- Cusimano, M.; Marshall, S.; Rinner, C.; Jiang, D.; Chipman, M. "Patterns of urban violent injury: a spatio-temporal analysis". *PLoS ONE*, 5(1): e8669. 2010.
- Danahy, J.; Mitchell, J.; Feick, R.; Wrigh, R. "Multi-Scale 3D geovisualization of urban heat island data for planning dialogue in Toronto". In: Nunes Silva C. (ed.), *Emerging Issues, Challenges and Opportunities in Urban E-Planning*, University of Lisbon, Portugal: 166-187. 2015.
- Devaraju, A.; Kuhn, W.; Renschler, C. "A formal model to infer geographic events from sensor observations". *International Journal of Geographical Information Science*, 29(1): 1-27. 2015.
- Dowman, I.; Jacobsen, K.; Konecny, G.; Sandau, R. "High resolution optical satellite imagery". Whittles Publishing, 230 p. 2012.
- Duckham, M. "Decentralized spatial computing: foundations of geosensor networks". Springer, Berlin. 2012.
- Eineder, M.; Adam, N.; Bamler, R.; Yague-Martinez, N.; Breit, H. "Spaceborne spotlight SAR interferometry with TerraSAR-X". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47(5): 1524-1535. 2009.
- Elseberg, J.; Borrmann, D.; Nüchter, A. "One billion points in the cloud-an octree for efficient processing of 3D laser scans". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 76(2): 76-88. 2013.
- El-Sheimy, N.; Liang, S.; Toth, C. "Integrated imaging and sensor fusion for rapid response and monitoring applications". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104:174. 2015.
- Evangelidis, K.; Ntouros, K.; Makridis, S.; Papatheodorou, C. "Geospatial services in the Cloud". *Computers & Geosciences*, 63: 116-122. 2014.
- Fang, Z.; Li Q.; Zhang, X.; Shaw, S. "A GIS data model for landmark-based pedestrian navigation". *International Journal of Geographical Information Science*, 26(5): 817-838. 2012.
- Felzenszwalb, P. F.; Girshick, R. B.; McAllester, D.; Ramanan, D. "Object detection with discriminatively trained part based models". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(9): 1627-1645. 2010.
- Fischler, M.; Bolles, R. "Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography". *Communications of the ACM*, 24(6): 381-395. 1981.
- Förstner, W. "Computer vision and remote sensing - lessons learned". In: Fritsch D. (ed.), *Photogrammetric Week 2009*. Heidelberg, 241-249. 2009.
- Förstner, W.; Gülch, E. "A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features". In: *Proc., ISPRS Intercommission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, 281-305. 1987.
- Frahm, J. M.; Gallup, D.; Johnson, T.; Raguram, R.; Wu, C.; Jen, Y. H.; Dunn, E.; Clipp, B.; Lazebnik, S.; Pollefeys, M. "Building Rome on a cloudless day". *European Conference on Computer Vision*: 368-381. 2010.
- Frénay, B.; Verleysen, M. "Classification in the presence of label noise: a survey". *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 25(5): 845-869. 2014.
- Fritz, S.; McCallum, I.; Schill, C.; Perger, C.; See, L.; Schepaschenko, D.; Van der Velde, M.; Kraxner, F.; Obersteiner, M. "Geo-Wiki: an online platform for improving global land cover". *Environmental Modeling & Software*, 31: 110-123. 2012.
- Furukawa, Y.; Ponce, J. "Accurate, dense and robust multi-view stereopsis". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 32(8): 1362- 1376. 2010.
- Gao, J.; Burt, J.; Zhu, A. X. "Neighborhood size and spatial scale in raster-based slope calculations". *International Journal of Geographical Information Science*, 26(10): 1959-1978. 2012.
- Gehrig, S.; Eberli, F.; Meyer, T. "A real-time low-power stereo vision engine using semi-global matching". In: *International Conference on Computer Vision Systems (LNCS 5815)*, 134-143. 2009.
- Gerke, M.; Heipke, C. "Image based quality assessment of road databases". *International Journal of Geoinformation Science*, 22 (8), 871-894. 2008.
- Giri, C.; Pengra, B.; Long, J.; Loveland, T. "Next generation of global land cover characterization, mapping, and monitoring". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 25: 30-37. 2013.
- Gislason, P. O.; Benediktsson, J. A.; Sveinsson, J. R. "Random forests for land cover classification". *Pattern Recognition Letters*, 27(4): 294-300. 2006.
- Goodchild, M.; Glennon, J. "Crowdsourcing geographic information for disaster response: a research frontier". *International Journal of Digital Earth*, 3(3): 231- 241. 2010.
- Gould, S.; Rodgers, J.; Cohen, D.; Elidan, G.; Koller, D. "Multi-class segmentation with relative location prior". *International Journal of Computer Vision*, 80(3): 300- 316. 2008.

- Gröger, G.; Plümer, L. "CityGML-Interoperable semantic 3D city models". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71: 12-33. 2012.
- Grossberg, M.D.; Nayar, K.S. "A general imaging model and a method for finding its parameters". *International Conference on Computer Vision*, 108-115. 2001.
- Gruber, M.; Walcher, W. "Calibrating the new ultracam osprey oblique aerial sensor". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3/W1, 47-52. 2014.
- Grün, A. "Scientific-technological development in photogrammetry and remote sensing between 2004 and 2008". In: Li Z., Chen J., Baltsavias M. (eds.), *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Taylor & Francis, London, 21-25. 2008.
- Haala N. "Multiray photogrammetry and dense image matching". In: Fritsch D. (ed.), *Photogrammetric Week 2011*, Wichmann, Heidelberg, 185-195. 2011.
- Hahmann, S.; Burghardt, D. "How much information is geospatially referenced? Networks and cognition". *International Journal of Geographical Information Science*, 27(6): 1171-1189. 2013.
- Han, G.; Chen, J.; He, C.; Li, S.; Wu, H.; Liao, A.; Peng, S. "A web-based system for supporting global land cover data production". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 66-80. 2015.
- Hansen, M. C.; Loveland, T. "A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data". *Remote Sensing of Environment*, 122: 66-74. 2012.
- Hansen, M.; Potapov, P.; Moore, R.; Hancher, M.; Turubanova, S.; Tyukavina, A.; Thau, D.; Stehman, S.; Goet, S.; Loveland, T.; Kommareddy, A.; Egorov, A.; Chini, L.; Justice, C.; Townshend, J. "High-resolution global maps of 21st-century forest cover change". *Science*, 342: 850-853. 2013.
- Harris, C.; Stephens, M. "A combined corner and edge detector". In: *Alvey Conference*, 147-152. 1988.
- Harris, R.; Baumann, I. "Open data policies and satellite Earth observation". *Space Policy* (32): 44-53. 2015.
- Hartley, R.; Zisserman, A. "Multiple view geometry in computer vision". 2nd edition, Cambridge University Press, Cambridge. 2003.
- Hecht, A. D.; Fiksel, J.; Fulton, S.; Yosie, T.; Hawkins, N.; Leuenberger, H.; Golden, J.; Lovejoy, T. "Creating the future we want". *Sustainability: Science, Practice & Policy*, 8(2): 62-75. 2012.
- Heipke, C. "Crowdsourcing geospatial data". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6): 550-557. 2010.
- Heipke, C.; Oberst, J.; Albertz, J.; Attwenger, M.; Dorninger, P.; Dorrer, E.; Ewe, M.; Gehrke, S.; Gwinner, K.; Hirschmüller, H.; Kim, J. R.; Kirk, R. L.; Mayer, H.; Muller, J. P.; Rengarajan, R.; Rentsch, M.; Schmidt, R.; Scholten, F.; Shan, J.; Spiegel, M.; Wählisch, M.; Neukum, G. and the HRSC Co-Investigator Team. "Evaluating planetary digital terrain models-the HRSC DTM test". *Planetary and Space Science*, 55(14): 2173-2191. 2007.
- Heipke, C.; Woodsford P. A.; Gerke, M. "Updating geospatial databases from images". In: Li Z., Chen J., Baltsavias M. (eds.), *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Taylor & Francis, London, 355-362. 2008.
- Helmholz, P.; Becker, C.; Breitkopf, U.; Büschenfeld, T.; Busch, A.; Braun, C.; Grünreich, D.; Müller, S.; Ostermann, J.; Pahl, M.; Rottensteiner, F.; Vogt, K.; Ziem, M.; Heipke, C. "Semi-automatic Quality Control of Topographic Data Sets". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78 (9): 959-972. 2012.
- Hey T.; Trefethen A. "Cyberinfrastructure for e-Science". *Science*, (308): 817-821. 2005.
- Hirschmüller, H. "Stereo processing by semi-global matching and mutual information". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2): 328-341. 2008.
- Hoberg, T.; Rottensteiner, F.; Feitosa, R. Q.; Heipke, C. "Conditional random fields for multitemporal and multiscale classification of optical satellite imagery". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53(2): 659-673. 2015.
- Hofmann, O.; Nave, P.; Ebner, H. "DPS: A digital photogrammetric system for producing digital elevation models and orthophotos by means of linear array scanner imagery". *The International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXIV-B3: 216-227. 1982.
- Honkavaara, E.; Arbiol, R.; Markelin, L.; Martinez, L.; Cramer, M.; Bovet, S.; Veje, N. "Digital airborne photogrammetry: A new tool for quantitative remote sensing? A state-of-the-art review on radiometric aspects of digital photogrammetric images". *Remote Sensing*, 1(3): 577-605. 2009.
- Huang, H.; Mayer, H. "Extraction of the 3D branching structure of unfoliated deciduous trees from image sequences". *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*, (6): 429-436. 2007.

- Huang, W.; Li, S.; Liu, X.; Ban, Y. "Predicting human mobility with activity changes". *International Journal of Geographical Information Science*, 29(9): 1569-1587. 2015.
- Hughes, C.; Sengupta, R.; Naik, V.; Saxena, D. "Geovisualization for cluster detection of Hepatitis A & E outbreaks in Ahmedabad, Gujarat, India". *Proceedings of the 3rd ACM SIGSPATIAL International Workshop on the use of GIS in Public Health*, Dallas, TX. 2014.
- Hughes, G. F. "On the mean accuracy of statistical pattern recognizers". *IEEE Transactions on Information Theory*, 14(1): 55-63. 1968.
- Hussain, M.; Chen, D.; Cheng, A.; Wei, H.; Stanley, D. "Change detection from remotely sensed images: from pixel-based to object-based approaches". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 80: 91-106. 2013.
- Hyde, P.; Dubayah, R.; Walker, W.; Blair, J. B.; Hofton, M.; Hunsaker, C. "Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (Lidar, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy". *Remote Sensing of Environment*, 102(1): 63-73. 2006.
- Hyypä, J.; Jaakola, A.; Chen, Y.; Kukko, A.; Kaartinen, H.; Zhu, L.; Alho, P.; Hyypä, H. "Unconventional LiDAR mapping from air, terrestrial and mobile". In: Fritsch D. (ed.), *Photogrammetric Week 2013*, Wichmann, Heidelberg, 205-214. 2013.
- Jeffery, K.; Asserson, A.; Houssos, N.; Brasse, V.; Jörg, B. "From open data to data-intensive science through CERIF". *Procedia Computer Science*, (33): 191- 198. 2014.
- Jeong, M.; Duckham, M. "Decentralized querying of topological relations between regions monitored by a coordinate-free geosensor network". *GeoInformatica*, 17(4): 669-696. 2013.
- Joseph, G. "Building Earth Observation Cameras". CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton, USA. 350 p. 2015.
- Joshi, A.; Josiane, M.; Sriram, I.; Robert, V.; Craig, J.; Jiajie, Z. "Usability evaluations of an interactive, internet enabled human centered SanaViz geovisualization application". *HCI in Business, LNCS*, (8527): 723-734. 2014.
- Kada, M. "Progressive transmission of 3D building models based on string grammars and planar half-spaces". *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-2: 9-14. 2014.
- Kauffman, J.; Arico, S. "New directions in sustainability science: promoting integration and cooperation". *Sustainability Science*, (9): 413-418. 2014.
- Kelmelis, J.; DeMulder, M.; Ogrosky, C.; Van Driel, N.; Ryan, B. "The national map from geography to mapping and back again". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(10): 1109-1118. 2003.
- Kim J. H. "Spatiotemporal scale dependency and other sensitivities in dynamic land-use change simulations". *International Journal of Geographical Information Science*, 27(9): 1782-1803. 2013.
- Kitt, B.; Ranft, B.; Lategahn, H. "Detection and tracking of independently moving objects in urban environments". *Proceedings of the 13th IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*: 1396-1401. 2010.
- Klinger, T.; Rottensteiner, F.; Heipke, C. "Pedestrian recognition and localisation in image sequences as bayesian inference". In: Kukulová Z, Heller J. (eds.), *Computer Vision Winter Workshop 2014*, Czech Society for Cybernetics and Informatics, 51-58. 2014.
- Klingner, B.; Martin, D.; Roseborough, J. "Street view motion-from-structure- from-motion". *International Conference on Computer Vision*, 953 - 960. 2013.
- Kolbe T. "Representing and exchanging 3D city models with CityGML-2". In: Lee J., Zlatanova S. (eds.), *3D Geo-Information Sciences*. Springer, Berlin, 15-31. 2009.
- Konecny, G. "Survey of the current status of mapping and map updating in the world". *UN-GGIM Conference*, Cambridge, UK, 24-26 July 2013.
- Krieger, G.; Moreira, A.; Fiedler, H.; Hajnsek, I.; Werner, M.; Younis, M.; Zink, M. "TanDEM-X: A satellite formation for high-resolution SAR interferometry". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(11): 3317-3341. 2007.
- Kuenzel, C.; Dech, S.; Wagner, W. "Remote sensing time series - revealing land surface dynamics". Springer, Berlin. 441 p. 2015.
- Kuhn, W.; Kauppinen, T.; Janowicz, K. "Linked data - A paradigm shift for geographic information science". In: Duckham M., Pebesma E., Stewart K., Frank A. (eds.), *GI Science (LNCS 8728)*, Springer, Berlin, 173-186. 2014.
- Kunz, M.; King, M. A.; Mills, J. P.; Miller, P. E.; Fox, A. J.; Vaughan, D. G.; Marsh S. H. "Multi-decadal glacier surface lowering in the Antarctic Peninsula". *Geophysical Research Letters*, 39, L19502, doi:10.1029/2012GL052823.3. 2012.

- Kwan, M.; Shen, Y.; Chai, Y. "Investigating commuting flexibility with GPS data and 3D geovisualization: a case study of Beijing, China". *Journal of Transport Geography*, (32): 1-11. 2013.
- Ladický, L.; Sturgess, P.; Russell, C.; Sengupta, S.; Bastanlar, Y.; Clocksin, W.; Torr P.H. S. "Joint optimization for object class segmentation and dense stereo reconstruction". *International Journal of Computer Vision*, 100(2): 122-133. 2012.
- Lafarge, F.; Descombes, X.; Zerubia, J.; Pierrot-Deseilligny, M. "Building reconstruction from a single DEM". *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1-8. 2008.
- Lafarge, F.; Mallet, C. "Creating large-scale city models from 3D-point clouds: a robust approach with hybrid representation". *International Journal of Computer Vision*, 99 (1): 69-85. 2012.
- Lee, J. G.; Kang, M. "Geospatial big data: challenges and opportunities". *Big Data Research*, 2(2): 74-81. 2015.
- Lee, J.; Alnasrallah, M.; Wong, D.; Beard, H.; Logue, E. "Impacts of scale on geographic analysis of health data: an example of obesity prevalence". *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3(4): 1198-1210. 2014.
- Li, G.; Fang, C. "Global mapping and estimation of ecosystem services values and gross domestic product: A spatially explicit integration of national 'green GDP' accounting". *Ecological Indicators*, 46: 293-314. 2014.
- Li, S. "Web mapping/GIS services and applications". In: Li Z., Chen J., Baltsavias M. (eds.), *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Taylor & Francis, London, 335-354. 2008.
- Li, S.; Dragičević, S.; Veenendaal, B. "Advances in web-based GIS, mapping services and applications". CRC Press. 2011.
- Li, S.; Yan, W. "Mashing up geospatial data services: implications of acceptable use policies". *Geomatica*, 64(1): 111-122. 2010.
- Li, W.; Wu, C. "Phenology-based temporal mixture analysis for estimating large-scale impervious surface distributions". *International Journal of Remote Sensing*, 35(2): 779-795. 2014.
- Li, Z. "Theories of map design in the digital era". *Cartography and Geographic Information Science*, 39(2): 71-75. 2012.
- Li, Z. "Transformation of spatial representation in scale dimension: A new paradigm for digital generalization of spatial data". *The International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXI-B3, 453-458. 1996.
- Li, Z.; Chen, J.; Baltsavias, M. (eds.). "Advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences". Taylor & Francis, London. 2008.
- Li, Z.; Huang, P. "Quantitative measures for spatial information of maps". *International Journal of Geographical Information Science*, 16(7): 699-709. 2002.
- Li, Z.; Zhou, Q. "Integration of linear- and areal-hierarchies for continuous multi-scale representation of road networks". *International Journal of Geographical Information Science*, 46(5): 855-880. 2012.
- Lichti, D. D.; Chow, J.; Lahamy, H. "Parameter decorrelation and model-identification in hybrid-style terrestrial laser scanner self-calibration". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 66 (3): 317-32. 2011.
- Liu, L.; Qiao, S.; Zhang, Y.; Hu, J. "An efficient outlying trajectories mining approach based on relative distance". *International Journal of Geographical Information Science*, 26(10): 1789-1810. 2012.
- Liu, X.; Li, S.; Huang, W.; Gong, J. "Designing sea ice web APIs for Ice Information Services". *Earth Science Informatics*, 8(3): 483-497. 2015.
- Long, Z.; Li, S. "A complete classification of spatial relations using the Voronoi-based nine-intersection model". *International Journal of Geographical Information Science*, 15(3): 201-220. 2013.
- Lowe, D. "Distinctive image features from scale-invariant keypoints". *International Journal of Computer Vision*, 60(2): 91-110. 2004.
- Lu, D.; Li, G.; Moran, E. "Current situation and needs of change detection techniques". *International Journal of Image and Data Fusion*, 5(1): 13-38. 2014.
- Lucas, R.; Blonda, P.; Bunting, P.; Jones, G.; Inglada, J.; Arias, M.; Kosmidou, V.; Petrou, Z.; Manakos, I.; Adamo, M.; Charnock, R.; Tarantino, C.; Múcher, C.; Jongman, R.; Kramer, H.; Arvor, D.; Pradinho-Honrado, J.; Mairota, P. "The Earth Observation Data for Habitat Monitoring (EODHaM) system". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, (37): 17-28. 2015.
- Majid, A.; Chen, L.; Chen, G.; Mirza, H.T.; Hussain, I.; Woodward, J. "A context-aware personalized travel recommendation system based on geotagged social media data mining". *International Journal of Geographical Information Science*, 27(4): 662-684. 2013.
- Mallet, C.; Bretar, F. "Full-waveform topographic LiDAR: State-of-the-art". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64(1): 1-16. 2009.

- Mayer, H. "Efficient hierarchical triplet merging for camera pose estimation". In: German Conference on Pattern Recognition-GCPR 2014, Springer, Berlin, 399- 409. 2014.
- Mayer, H. "Object extraction in photogrammetric computer vision". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, (63) 2: 213-222. 2008.
- McBean, G. A. "The grand challenges of integrated research on disaster risk". Extreme Natural Hazards, Disaster Risks and Societal Implications, (1): 15. 2014.
- McDowell, N.; Coops, N.; Beck, P.; Chambers, J.; Gangodagamage, C.; Hicke, J.; Huang, C.; Kennedy, R.; Krofcheck, D.; Litvak, M.; Medens, A.; Muss, J.; Negron- Juarez, R.; Peng, C.; Schwantes, A.; Swenson, J.; Vernon, L.; Williams, A.; Xu, C.; Zhao, M.; Running, S.; Allen, C. "Global satellite monitoring of climate-induced vegetation disturbances". Trends in Plant Science, 20 (2):114-123. 2015.
- McInerney, D., Bastin, L.; Díaz, L.; Figueiredo, C.; Barredo, J.; San-Miguel Ayanz, J. "Developing a forest data portal to support multi-scale decision making". IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 5(6): 1692-1699. 2012.
- Menze, M.; Geiger, A. "Object scene flow for autonomous vehicles". IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition: 3061-3070. 2015.
- Menze, M.; Heipke, C.; Geiger, A. "Joint 3D estimation of vehicles and scene flow". ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W5: 427-434. 2015.
- Miller, H. J. "Tobler's first law and spatial analysis". Annals of the Association of American Geographers, 94 (2): 284-289. 2004.
- Miller, H. J.; Han, J. (eds.). "Geographic data mining and knowledge Discovery". CRC Press. 2009.
- Moudrý, V.; Šímová, P. "Influence of positional accuracy, sample size and scale on modelling species distributions: a review". International Journal of Geographical Information Science, 26(11): 2083-2095. 2012.
- Mouillot, F.; Schultz, M.; Yue, C.; Cadule, P.; Tansey, K.; Ciais, P.; Chuvieco, E. "Ten years of global burned area products from spaceborne remote sensing-A review: Analysis of user needs and recommendations for future developments". International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 26: 64-79. 2014.
- Mountrakis, G.; Im, J.; Ogole, C. "Support vector machines in remote sensing: A review". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 66(3): 247-259. 2011.
- Nagai, M.; Chen, T.; Shibasaki, R.; Kumagai, H.; Ahmed, A. "UAV-borne 3-D mapping system by multisensor integration". IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 47(3): 701-708. 2009.
- Nex, F.; Gerke, M.; Remondino, F.; Przybilla, H.J.; Baumker, M.; Zurhorst, A. "ISPRS Benchmark for multi-platform photogrammetry". ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, II-3/W4, 135-142. 2015.
- Niemeyer, J.; Kogut, T.; Heipke, C. "Airborne Laser bathymetry for monitoring the German Baltic Sea Coast". In: Seyfert E., Gülch E., Heipke C., Schiewe J., Sester (eds.): DGPF Annual Meeting Nr. 23, München, 10 p. 2014b.
- Niemeyer, J.; Rottensteiner, F.; Soergel, U. "Contextual classification of LiDAR data and building object detection in urban áreas". ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 87(1): 152-165. 2014a.
- Nistér, D. "An efficient solution to the five-point relative pose problem". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 26(6): 756-770. 2004.
- Niu, Z.; Li, S.; Pousaeid N. "Road extraction using smart phones GPS". In: 2nd ACM International Conference on Computing for Geospatial Research & Applications, 1-6. 2011.
- Obradovic, Z.; Das, D.; Radosavljevic, V.; Ristovski, K.; Vucetic, S. "Spatio- temporal characterization of aerosols through active use of data from multiple sensors". The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XXXVIII-7B, 424-429. 2010.
- O'Riordan, T. "Future Earth: A refreshed sustainability science". Environment: Science and Policy for Sustainable Development, 55(3): 2. 2013.
- Pajeres, G. "Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles". Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 81(4): 281-329. 2015.
- Palm, S.; Pohl, N.; Stilla, U. "Challenges and potentials using multi aspect coverage of urban scenes by airborne SAR on circular trajectories". The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-3/W2), 149-154. 2015.
- Pan, S. J.; Yang, Q. "A survey on transfer learning". IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, 22(10): 1345-1359. 2010.

- Paparoditis, N.; Boudet, L.; Tournaire, O. "Automatic man-made object extraction and scene reconstruction from geomatic images". URBAN, GRSS/ISPRS Joint Workshop on Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas, Paris, France. 1-6. 2007.
- Paparoditis, N.; Papelard, J. P.; Cannelle, B.; Devaux, A.; Soheilian, B.; David, N.; Houzay, E. "Stereopolis II: A multi-purpose and multi-sensor 3D mobile mapping system for street visualisation and 3D metrology". *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 200: 69-79. 2012.
- Parmentier, B.; Eastman, J.R. "Land transitions from multivariate time series: using seasonal trend analysis and segmentation to detect land-cover changes". *International Journal of Remote Sensing*, 35(2): 671-692. 2014.
- Pereira, H. M. Ferrier, S.; Walters, M.; Geller, G.; Jongman, R.; Scholes, R.; Bruford, M.; Brummitt, N.; Butchart, S.; Cardoso, A.; Coops, N.; Dulloo, E.; Faith, D.; Freyhof, J.; Gregory, R.; Heip, C.; Höft, R.; Hurtt, G.; Jetz, W.; Karp, D.; McGeoch, M.; Obura, D.; Onoda, Y.; Pettorelli, N.; Reyers, B.; Sayre, R.; Scharlemann, J.; Stuart, S.; Turak,.; Walpole, M.; Wegmann, M. "Essential biodiversity variables". *Science Magazine*, 339 (6117): 277-278. 2013.
- Pielke, S. R.; Pitman, A.; Niyogi, D.; Mahmood, R.; McAlpine, C.; Hossain, F.; Goldewijk, K.; Nair, U.; Betts, R.; Fall, S.; Reichstein, M.; Kabat, P.; De Noblet, N. "Land use/land cover changes and climate: Modeling analysis and observational evidence". *Wires Climatic Change*, 2(6): 828-850. 2011.
- Pierrot-Deseilligny, M.; Paparoditis, N. "A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to surface reconstruction from SPOT5- HRS stereo imagery". *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI-1/W41, 5p. 2006.
- Popa, I. S.; Zeitouni, K.; Oria, V.; Kharrat, A. "Spatio-temporal compression of trajectories in road networks". *GeoInformatica*, 9(1): 117-145. 2015.
- Qin, R.; Grün, A. "3D change detection at street level using mobile laser scanning point clouds and terrestrial images". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 90: 23-35. 2014.
- Quartulli, M.; Olaizola, I. "A review of EO image information mining". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 75: 11-28. 2013.
- Rabe, C.; Müller, T.; Wedel, A.; Franke, U. "Dense, robust and accurate motion field estimation from stereo image sequences in real-time". *European Conference on Computer Vision*, 582-595. 2010.
- Raguse, K.; Heipke, C. "Synchronization of image sequences - a photogrammetric method". In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(5): 535-546. 2009.
- Reid, W.; Chen, D.; Goldfarb, L.; Hackmann, H.; Lee, Y.; Mokhele, K.; Ostrom, E.; Raivio, K.; Rockström, J.; Schellnhuber, H.; Whyte, A. "Earth system science for global sustainability: grand challenges, environment and development". *Science*, 330 (6006): 916-917. 2010.
- Remondino, F.; Fraser, C. "Digital camera calibration methods: considerations and comparisons". *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVI-5, 266-272. 2006.
- Ren, A. Z.; Shi, J. Y.; Shi, W. Z. "Integration of fire simulation and structural analysis for safety evaluation of gymnasiums-with a case study of gymnasium for Olympic Games in 2008". *Automation in Construction*, 16(3): 277-289. 2007.
- Ricotta, C.; Carranza, M. "Measuring scale-dependent landscape structure with rao's quadratic diversity". *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 2(2): 405-412. 2013.
- Ripperda, N. "Grammar based facade reconstruction using RJMCMC". *Photogrammetrie Fernerkundung. Geoinformation*, (2): 83-92. 2008.
- Robinson, N.; Regetz, J.; Guralnick, R. "EarthEnv-DEM90: A nearly-global, void- free, multi-scale smoothed, 90m digital elevation model from fused ASTER and SRTM data". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 87: 57-67. 2014.
- Roig, G.; Boix, X.; Ben Shitrit, H.; Fua, P. "Conditional random fields for multi- camera object detection". *International Conference on Computer Vision*, 563- 570. 2011.
- Rottensteiner, F.; Sohn, G.; Gerke, M.; Wegner, J.; Breitkopf, U. "Results of the ISPRS benchmark on urban object detection and 3D building reconstruction". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93(7): 256-271. 2014.
- Ruiz, M.; López, F.; Páez, A. "Comparison of thematic maps using symbolic entropy". *International Journal of Geographical Information Science*, 26(3): 413- 439. 2012.
- Sandau, R. (ed.). "Digital airborne camera". Springer, Berlin. 2009.
- Sandau, R.; Röser, H. P.; Valenzuela, A. (eds.). "Small satellite missions for Earth observation - New developments and trends". 2011, Springer, Berlin.

- Schiermeier M. "Outlook for earth - A special issue on the IPCC". *Nature* 19, (501/297): 304-305. 2013.
- Schindler, K. "An overview and comparison of smooth labeling methods for land- cover classification". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(11): 4534-4545. 2012.
- Schindler, K.; Ess, A.; Leibe, B.; Van Gool, L. "Automatic detection and tracking of pedestrians from a moving stereo rig". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(6): 523-537. 2010.
- Schmeller, D. S.; Julliard, R.; Bellingham, P.; Böhm, M.; Brummitt, N.; Chiarucci, A.; Couvet, D.; Elmendorf, S.; Forsyth, D.; Moreno, J.; Gregory, R.; Magnusson, W.; Martin, L.; McGeoch, M.; Mihoub, J.B.; Proenca, V.; Van Swaay, C.; Yahara, T.; Belnap, J. "Towards a global terrestrial species monitoring program". *Journal for Nature Conservation*, 25: 51-57. 2015.
- Schubert, J.; Moradi, F.; Asadi, H.; Luotsinen, L.; Sjöberg, E.; Höfling, P.; Linderhed, A.; Oskarsson, D. "Simulation-based decision support for evaluating operational plans". *Operations Research Perspectives*, (2): 36-56. 2015.
- See, L.; Schepaschenko, D.; Lesiv, M.; McCallum, I.; Fritz, S.; Comber, A.; Perger, C.; Schill, C.; Zhao, Y.; Maus, V.; Athar, M.; Albrecht, S.; Cipriani, A.; Vakolyuk, M.; Garcia, A.; Rabia, A.; Singha, K.; Marcarini, A.; Kattenborn, T.; Hazarika, R.; Schepaschenko, M. "Building a hybrid land cover map with crowdsourcing and geographically weighted regression". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 103: 48-56. 2015.
- Sester, M.; Arsanjani, J.; Klammer, R.; Burghardt, D.; Haunert, J. "Integrating and Generalizing Volunteered Geographic Information". In: Burghardt/Duchene/Mackaness (eds.): *Abstracting Geographic Information in a Data Rich World - Methodologies and Applications of Map Generalisation*, Springer, Berlin. 2014.
- Sester, M.; Brenner, C. "A vocabulary for a multiscale process description for fast transmission and continuous visualization of spatial data". *Computers & Geosciences*, 35(11): 2177-2184. 2009.
- Sieber, R.; Hollenstein, L.; Eichenberger, R. "Concepts and techniques of an online 3D atlas-challenges in cartographic 3d geovisualization". In: *Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation. Applications and Case Studies*, LNCS (7610), Springer, Berlin, 325-326. 2012.
- Simón, L.; Ramos, F.; Avilés, R.; Botezan, I.; Del Valle Gastaminza, F.; Cobo, Serrano S. "Open data as universal service, new perspectives in the information profession". *Procedia - social and behavioral sciences*, (147): 126 -132. 2014.
- Spiegel, M. "Improvement of interior and exterior orientation of the three-line camera HRSC with a simultaneous adjustment". *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI- 3/W49B*: 161-166. 2007.
- Stange, H.; Bothe, S. "Reality monitoring". *Crisis Prevention*, 2(1): 25-27. 2013.
- Steiniger, S.; Hunter A. "The 2012 free and open source GIS software map-A guide to facilitate research, development, and adoption". *Computers, Environment and Urban Systems*, 39: 136-150. 2013.
- Stettner, R. "Compact 3D flash LiDAR video cameras and applications". In: Turner M., Kamerman G. (eds.), *Proc. SPIE 7684, Laser Radar Technology and Applications XV*, 8 p. 2010.
- Stoter, J.; Post, M.; Van Altena, V.; Nijhuis, R.; Bruns, B. "Fully automated generalization of a 1: 50k map from 1: 10k data". *Cartography and Geographic Information Science*, 41(1): 1-13. 2014.
- Strecha, C.; Pylvänäinen, T.; Fua, P. "Dynamic and scalable large-scale image reconstruction". *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 358-365. 2010.
- Sui, D.; Elwood, S.; Goodchild, M. (eds.). "Crowdsourcing geographic knowledge, volunteered geographic knowledge in theory and practice". Springer, Berlin. 2013.
- Suresh, S. "Global challenges need global solutions". *Nature*, (490) 8: 337-338. 2012.
- Swain, N.; Latu, K.; Christensen, S.; Jones, N.; Nelson, J.; Ames D.; Williams G. "A review of open source software solutions for developing water resources web applications". *Environmental Modelling & Software*, 67: 108-117. 2015.
- Thrun, S.; Burgard, W.; Fox, D. "Probabilistic robotics". The MIT Press, Cambridge, MA. 2005.
- Ti, P.; Li, Z. "Generation of schematic network maps with automated detection and enlargement of congested areas". *International Journal of Geographical Information Science*, 28(3): 521-540. 2014.
- Tournaire, O.; Brédif, M.; Boldo, D.; Durupt, M. "An efficient stochastic approach for building footprint extraction from digital elevation models". *ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing*, 65(4): 317-327. 2010.
- Trinder, J.; Fritz, L. "Historical development of ISPRS, in advances in photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences". In: Li Z., Chen J., Baltsavias M. (eds.), *Advances in Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Taylor & Francis, London, 3-13. 2008.

- UN-GGIM. "United Nations Global Geospatial Information Management: Future trends in geospatial information management - the five to ten-year vision". New York, ISBN: 978-0-319-08792-3. 2013.
- Vallet, B.; Brédif, M.; Serra, A.; Marcotegui, B.; Paparoditis, N. "TerraMobilita/iQmulus Urban Point Cloud Analysis Benchmark". *Computers & Graphics*, 49(6): 126-133. 2015.
- Van de Weghe, N.; De Roo, B.; Qiang, Y.; Versichele, M.; Neutens, T.; De Maeyer, P. "The continuous spatio-temporal model (CSTM) as an exhaustive framework for multiscale spatio-temporal analysis". *International Journal of Geographical Information Science*, 28(5): 1047-1060. 2014.
- Van Dijk, T.; Haurert, J. "Interactive focus maps using least-squares optimization". *International Journal of Geographical Information Science*, 28(10): 2052-2075. 2014.
- Van Gasselt, S.; Nass A. "Planetary mapping - The data model's perspective and GIS framework". *Planetary and Space Science*, 59: 1231-1242. 2011.
- Vaz, E.; Aversa, J. "A Graph theory approach for geovisualization of land use change: An application to Lisbon". *Journal of Spatial and Organizational Dynamics*, 1(4): 254-264. 2013.
- Vogel, C.; Schindler, K.; Roth, S. "Piecewise rigid scene flow". *International Conference on Computer Vision*, 1377 - 1384. 2013.
- Vosselman, G. "Advanced point cloud processing". In: Fritsch (ed.), *Photogrammetric Week 2009*, Wichmann, Heidelberg, 137-146. 2009.
- Whitcraft, A.; Becker-Reshef, I.; Justice, C. "A framework for defining spatially explicit earth observation requirements for a global agricultural monitoring initiative". *Remote Sensing*, 7: 1461-1481. 2015.
- Wise, S. "GIS data modelling-lessons from the analysis of DTMs". *International Journal of Geographical Information Science*, 14(4): 313- 318. 2000.
- Wojek, C.; Roth, S.; Schindler, K.; Schiele, B. "Monocular 3D scene modeling and inference: understanding multi-object traffic scenes". *Europ. Conference on Computer Vision*, 467-481. 2010.
- Xiao, N.; Armstrong, M. "Towards a multiobjective view of cartographic design". *Cartography and Geographic Information Science*, 39(2): 76-87. 2012.
- Xiong, B.; Jancosek, M.; Elberink, S. O.; Vosselman, G. "Flexible building primitives for 3D building modeling". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 101: 275-290. 2015.
- Yang, C.; Xu, Y.; Nebert, D. "Redefining the possibility of digital Earth and geosciences with spatial cloud computing". *International Journal of Digital Earth*: 6(4): 297-312. 2014.
- Yang, M.; Förstner, W. "A hierarchical conditional random field model for labelling and classifying images of man-made scenes". *International Conference on Computer Vision Workshops (WS04)*, 196-203. 2011.
- Zell, E.; Huff, A.; Carpenter, A.; Friedl, L. "A user-driven approach to determining critical earth observation priorities for societal benefit". *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 5(6): 1594-1602. 2012.
- Zhang, L.; Thiemann, F.; Sester, M. "Integration of GPS traces with road map". *Proceedings of the 2nd International Workshop on Computational Transportation Science*, 17-22. 2010.
- Zhao, P.; Foerster, T.; Yue, P. "The geoprocessing web". *Computers & Geosciences*, 47: 3-12. 2012.
- Zhou, Q.; Li, Z. "Use of artificial neural networks for selective omission in updating road networks". *The Cartographic Journal*, 51(1): 38-51. 2014.
- Zhou, X.; Chen, J.; Zhan, B.; Li, Z.; Madden, M.; Zhao, R.; Liu, W. "A Euler number-based topological computation model for land parcel database updating". *International Journal of Geographical Information Science*, 27(10): 1983-2005. 2013.
- Zhu, X.; Bamler, R. "Super-resolution power and robustness of compressive sensing for spectral estimation with application to spaceborne tomographic SAR". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(1): 247-258. 2012.
- Zia, M. Z.; Stark, M.; Schiele, B.; Schindler, K. "Detailed 3D representation for object recognition and modeling". *IEEE Transactions on Pattern Recognition and Machine Intelligence*, 35(11): 2608-2623. 2013.
- Zink, M.; Bachmann, M.; Bräutigam, B.; Fritz, T.; Hajnsek, I.; Krieger, G.; Moreira, A.; Wessel, B. "TanDEM-X: The new global DEM takes shape". *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2(2): 8-23. 2014.