Agricultura y tecnología digital

Cómo aprovechar al máximo la tecnología digital para contribuir a la transición hacia la agricultura y sistemas alimentarios sostenibles

Inria INRAE | LIBRO BLANCO | N°06

Del original:
Véronique Bellon-Maurel, Ludovic Brossard, Frédérick Garcia, Nathalie Mitton, Alexandre Termier. Agriculture and Digital Technology: Getting the most out of digital technology to contribute to the transition to sustainable agriculture and food systems. pp.1-185, 2022, 10.17180/wmkb-ty56-en hal-03604970
1º Edición
Fecha de publicación: Febrero 2022, Francia
© Inria

Traducción autorizada del idioma inglés de la edición publicada por Inria
© Inria 2022

Traducción al español realizada por Inria Chile
© Inria 2022

Coordinación general y revisión técnica: Nayat Sánchez Pi

Coordinación de producción: Julia Allirot y Katherine Lippi

Coordinación ejecutiva: Andrés Vignaga

Revisión gráfica y maquetación: Mia Elbo y Katherine Lippi

Agradecimientos – Gracias a las siguientes personas de Inria Chile por sus aportes a la revisión técnica: Jaime Aranda, Sebastián Aranda, Hugo Carrillo, Hernán Lira, Astrid Reyes, Luis Valenzuela, Natalia Vidal, Andrés Vignaga

Impreso por Lahosa
Impresión: Octubre 2022, Chile

ISBN: 978-956-09873-3-4

ISBN de la edición original: 978-2-7261-1310-3

Impreso en Chile / Printed in Chile

Agricultura y tecnología digital

Prólogo

Este libro blanco es una iniciativa promovida por las juntas directivas de INRAE e Inria, quienes nos reúnen, nos encomiendan y nos dan carta blanca en la coordinación y redacción del presente trabajo sobre tecnología digital en la agricultura desde una perspectiva de investigación.
Nuestras reflexiones se han llevado a cabo en el contexto de las dinámicas principales de la agricultura observadas y predecibles en los países alrededor del mundo, que apuntan a apoyar el desarrollo de más sistemas agrícolas y alimentarios sostenibles. Al elaborar el análisis y las propuestas que se presentan en esta publicación, en base a un inventario de los desafíos, oportunidades y riesgos asociados a la tecnología digital en agricultura, nuestro objetivo no ha sido solamente centrarnos en el consenso de las opiniones, sino también poder expresar la diversidad de los grupos involucrados, especialmente en cuanto a priorizar los desafíos o el alcance de los peligros para la agricultura y los sistemas alimentarios del futuro. Este libro blanco es una obra colectiva cuyo objetivo es abordar el tema de la tecnología digital en la agricultura como un todo balanceado; sus capítulos están estructurados en secuencias e interconectados en una forma que permite cubrir todos los aspectos. Por lo tanto, cada sección se debe considerar en relación con las otras. Referirse a ellas de manera aislada sin mirar el panorama completo puede dar pie a un análisis desbalanceado.

Veronique Bellon-Maurel, INRAE, Ludovic Brossard, INRAE, Frédérick Garcia, INRAE, Nathalie Mitton Inria, Alexandre Termier, Université de Rennes 1 / Inria.

Diseño: Françoise Perret
Dirección de Arte: Sophie Barbier

Ilustración de la cubierta: © Smart Farm por SBTS de NounProject.com

Índice

Resumen ejecutivo 5

Los desafíos que enfrenta la agricultura requieren econsiderar los métodos de producción y suministro de alimentos 6

Fundamentos y estado del arte en tecnologías y metodologías 8

La tecnología digital ofrece oportunidades para la agroecología y la alimentación sostenible 10

Riesgos identificados que se deben evitar 12

Desafíos en el desarrollo de la tecnología digital para la agricultura del mañana 15

Conclusión general 17

1. Introducción 19

2. ¿Cuáles son los desafíos que enfrenta la agricultura? 24

2.1 La seguridad alimentaria mundial sometida a presión 25

2.2 Existe una necesidad urgente de reducir los impactos medioambientales negativos de la agricultura 27

2.3 La dinámica agrícola ha favorecido la intensificación y la especialización 28

2.4 ¿Cuáles son los modelos agrícolas del futuro? 29

2.5 La naturaleza territorial de la agricultura 31

Conclusión 32

3. Fundamentos y estado del arte 34

3.1 Datos 35

Captura de datos (qué, por qué, dónde y cómo) 35

Recolección y transmisión de datos (qué datos enviar, cuándo y cómo) 37

Almacenamiento e intercambio de datos, trazabilidad 40

3.2 Modelado, simulación y optimización 42

Qué modelar, para qué propósito y con qué herramientas 43

Marcos de representación 46

Modelado y simulación 51

Modelado y optimización 52

3.3 Aprendizaje multiescala y extracción de conocimiento 54
Datos masivos en la agricultura 54
Preprocesamiento de datos 56
Enfoques supervisados 58
Enfoques no supervisados 60
Aprendizaje por refuerzo 62
Almacén de datos y análisis OLAP 63
3.4 Gestión del conocimiento e ingeniería para apoyar la toma de decisiones en la agricultura 65
Sistemas basados en conocimiento en la agricultura 66
Restitución del conocimiento, visualización y la interacción hombre-máquina en la agricultura 75
Sistemas de apoyo a la toma de decisiones (Decision Support Systems o DSS) 78
3.5 Automatización, control y robótica 80
Entornos estructurados: aliados de los robots 81
De la adaptación a la reconfiguración 83
Conclusión 84

4. Tecnología digital y agroecología: oportunidades por explorar, retos por superar 85
4.1 Mejorar la producción: crear conocimientos para apoyar la transición hacia la agroecología. 87
Representación de los sistemas complejos en la agroecología 88
Recopilación de datos a gran escala para nuevos agroecosistemas 88
Modelado basado en datos: un paso hacia nuevos conocimientos 89
4.2 Mejorar la producción: utilizar tecnología digital para ayudar a los agricultores en la gestión de sus explotaciones agrícolas 90
Adaptación de los principios de la agricultura de precisión a la agroecología: observar y tomar decisiones 90
La toma de decisiones para múltiples objetivos en la agroecología 93
El codiseño de equipos agrícolas y agroecosistemas innovadores 93
4.3 Mejorar la integración dentro del ecosistema regional o económico agrícola 95
La reconfiguración de los servicios agrícolas por la tecnología digital 95
Remodelar las cadenas de valor para una mayor conectividad del mercado 97
Gestionar los recursos a nivel regional 100

4.4 Apoyar la transición: compartir datos, información y conocimientos 102
La tecnología digital: una ventaja para compartir el conocimiento 102
Enfoque participativo e innovación abierta 103
Los agricultores como productores de datos 104
4.5 Retos específicos para el Sur Global 106
Conclusión 109

5. Riesgos 110
5.1 Comprometiendo la transición ecológica en la agricultura 112
La transición agroecológica y el bloqueo tecnológico (lock-in) 112
El alejamiento del ser humano de la naturaleza 113
La contribución a la creciente huella medioambiental de la tecnología digital 114
5.2 La profundización de la desigualdad y del desequilibrio de poder 115
Riesgos de exclusión 115
La pérdida de autonomía de los agricultores 116
Control de los sectores aguas arriba y aguas abajo 116
Acceso a la información y a la capacitación: ¿qué papel puede desempeñar el asesoramiento? 118
5.3 Pérdida de soberanía 118
Pérdida de autonomía en el suministro de alimentos 119
Confiscación de datos agrícolas 119
Pérdida de control sobre los equipos de producción 120
Un reto para la ciberseguridad 121
5.4 Acentuación de las vulnerabilidades y los rendimientos negativos 121
Las vulnerabilidades del sistema agroalimentario 121
Complejidad creciente, rendimientos menguantes y riesgos asociados 122
Conclusión 124

6. Desafíos para el futuro 125
6.1 Proporcionar herramientas digitales para la gestión colectiva a nivel regional 126
Seguimiento y medición a nivel regional 126
Visualización 129
Dispositivos digitales de participación, mediación y gobernanza 130
6.2 Ayudar a los agricultores a gestionar su trayectoria técnica 132
Sistemas de adquisición y diagnóstico 132

Los retos de la robotización y la transformación digital de la mano de obra agrícola 134
El modelado para incorporar los efectos sistémicos y el desarrollo de herramientas prácticas y utilizables en el apoyo a la toma de decisiones 137
6.3 Transformar las relaciones entre las partes interesadas dentro de los sectores 140
Servicio: asesoramiento y seguros 140
Trazabilidad, transparencia total de la cadena de suministro, ciclo de vida de los datos 141
La "plataformización" y reconfiguración de canales 143
6.4 Crear y compartir datos y conocimientos 145
Conclusión 147

Conclusión **152**

Contribuciones y agradecimientos **162**

Referencias bibliográficas **164**

Glosario **202**

Resumen ejecutivo

En todo el mundo, los sistemas alimentarios están sufriendo profundos cambios debido a presiones externas (cambio climático, organización de las cadenas de valor, etc.) y factores intrínsecos (innovación, reducción en el número de agricultores, etc.) La seguridad alimentaria es la preocupación primordial a nivel global y hoy en día viene acompañada de una gran demanda de métodos de producción para ser más sostenible y de la protección de una estructura rural viva basada en una agricultura familiar atractiva. Esta es la razón, como nos recuerda la FAO[1] , de por qué la agroecología es un tema vital en cada vez más países, lo que incluye a Francia. En paralelo a estos cambios, la agricultura, al igual que todos los sectores económicos, está experimentando un auge significativa en el uso de la tecnología digital. Desde mediados de la década de 2010, el concepto de "agricultura digital" ha empezado a surgir con fuerza. Define tanto una forma de agricultura como un sistema de alimentación que usa la tecnología y la ciencia digital para la captación de datos (satélites, sensores, objetos conectados, teléfonos inteligentes, etc.), transferencia y almacenamiento (cobertura 3G/4G/5G, redes satelitales y terrestres de baja velocidad, nubes) y procesamiento remoto e integrado (acceso a supercomputadoras a través de redes de comunicación de

1. FAO (2018b), Initiative de passage à l'échelle supérieure de l'agroécologie, available at http://www.fao.org/3/I9049FR/i9049fr.pdf

alta velocidad, inteligencia artificial) en todos los niveles de la producción agrícola y en su ecosistema (granjas, servicios de apoyo, territorios, cadenas de valor[2]).

Los gobiernos y expertos a menudo ven la tecnología digital como una oportunidad para contribuir al desarrollo de la agricultura en beneficio de los agricultores, consumidores y la sociedad en general. No obstante, ¿qué significa esto?, ¿qué herramientas digitales se deben desarrollar?

Este libro blanco intenta esclarecer estos temas y ofrecer perspectivas de investigación para entender, dominar, preparar, equipar y apoyar el despliegue de tecnología digital en la agricultura y la cadena de alimentos de la mejor manera posible. A la vez, considera la forma en que la tecnología digital transformará los sectores y sus ecosistemas, con el objetivo de usarlo para apoyar la transición agroecológica (AET, por sus siglas en inglés) y la territorialización de los alimentos y las cadenas de producción reequilibradas. Este libro se divide en seis capítulos. Después de la introducción, el Capítulo 2 muestra los desafíos que conlleva transformar la agricultura y los sistemas de alimentación. Se entrega una descripción general de la última tecnología, seguida por una explicación de las tecnologías digitales existentes (Capítulo 3). Luego, se establece un inventario de las posibilidades que ofrece la tecnología digital para la transición agroecológica y una mejor inclusión en la sociedad (Capítulo 4). La identificación de los riesgos junto con el desarrollo no controlado de la agricultura digital es igual de necesario para evitar o minimizar los escollos (Capítulo 5). El Capítulo 6 presenta los temas y desafíos técnicos identificados que no tan solo podrían movilizar y motivar a nuestros dos institutos, INRAE e Inria, sino también al ecosistema de investigación francés, en particular en relación con el desarrollo de la tecnología digital responsable para la agricultura.

Los desafíos que enfrenta la agricultura requieren reconsiderar los métodos de producción y suministro de alimentos

En la actualidad, una serie de cambios globales ha sometido al sistema agroalimentario a considerables presiones. Por un lado, existe una población que crece (9,5 mil millones de personas en el año 2050 según los pronósticos de la ONU), cuya dieta está cambiando (China, por ejemplo) y que se debe alimentar a la vez que debe adaptarse a un panorama de cada vez mayor devastación: el cambio climático, colapso de la biodiversidad, reducción de recursos (suelo, agua potable,

2. Bellon-Maurel V., Huyghe C. (2016) *L'innovation technologique en agriculture. Géoéconomie,* 80 - Mayo/Junio 2016, páginas. 159-180

fósforo), etc. Por otro lado, la agricultura debe acelerar cambios para implementar sistemas de producción de ganado que sean más respetuosos del bienestar animal y reduzca su impacto sobre el medio ambiente (reducción del uso de insumos como antimicrobianos, fertilizantes, pesticidas, uso racionado de recursos naturales tales como el agua, la reducción de la compactación del suelo y las emisiones de gas efecto invernadero, mejor uso de regulaciones biológicas) y contribuir al almacenamiento[3] de CO_2 y la preservación de la biodiversidad. Durante los últimos 70 años, la dinámica agrícola ha favorecido la intensificación y la especialización. Los sectores agropecuarios se basan en precios competitivos, un fenómeno que se ve exacerbado por la globalización. Esencialmente, están sometidos a relaciones de poder desbalanceadas entre actores con intereses diversos, incluso divergentes. Además, la agricultura se lleva a cabo en territorios que, en muchos casos, llegan a ser especializados, lo que se traduce en desequilibrios. Esto conlleva a una gran complejidad (en términos de especialización e interdependencia de estos elementos) que profundiza las inestabilidades, multiplica los riesgos de fracaso y en definitiva es un mayor impedimento para el cambio. Por lo tanto, es fundamental implementar muy rápidamente estrategias para mejorar las técnicas de producción y las formas de organización del sistema agroalimentario a fin de aumentar su resiliencia.

Según la FAO, la producción puede evolucionar hacia dos modelos[4]: ya sea la intensificación sostenible (mejora de la eficiencia del proceso e integración hacia las cadenas de producción más largas), o la agroecología[5], que se basa en los procesos naturales de producción y utiliza sistemas alimentarios locales y soberanos. En la actualidad la ley francesa EGAlim[6] y muchos ciudadanos y autoridades locales apoyan este segundo modelo. La estructura agropecuaria es también un punto de atención: es importante proporcionar las condiciones para un trabajo decente de los agricultores y proteger la agricultura familiar, que existe en la mayoría el mundo.

En este contexto, la tecnología digital puede contribuir a la transición virtuosa hacia la agroecología en los sistemas alimentarios territorializados y la protección de la agricultura familiar al proporcionar información para comprender mejor estos sistemas complejos y el apoyo en la toma de decisiones individual o colectiva,

3. https://www.4p1000.org/fr/linitiative-4-pour-1000-en-quelques-mots

4. HLPE (2016). Sustainable agricultural development for food security and nutrition: what roles for livestock? A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security. Roma, Italia. http://www.fao.org/3/a-i5795e.pdf

5. La agroecología es un conjunto de prácticas que apuntan a mejorar los sistemas agrícolas al "imitar" los procesos naturales, y así crear interacciones biológicas beneficiosas entre los componentes del agroecosistema.

6. La ley n.º 2018-938 del 30 de octubre de 2018 para las relaciones comerciales equilibradas en el sector agrícola y alimenticio y alimentos saludables y sostenibles accesibles a todos (1). Disponible en: https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000037547946/

así como también apoyar la acción concreta, el intercambio, la reconfiguración de las cadenas de valor y el desarrollo de estrategias y políticas, entre otros. Es precisamente este camino de colocar la tecnología digital al servicio de la transición de la agroecología y la renovación de los sistemas alimentarios que hemos elegido explorar en este libro blanco.

Fundamentos y tecnologías y metodologías de punta

Antes de hacer una reflexión sobre la tecnología digital diseñada para ayudar a esta ambición transformativa, el primer paso es ver qué pueden ofrecer los actuales avances en investigación. La agricultura digital se basa en tres palancas de acción que, cuando se movilizan juntas, llevan a las innovaciones: (1) la abundancia de los datos debido al desarrollo de sensores (desde nanosensores a satélites) y la comunicación y almacenamiento facilitados, (2) capacidades computacionales, que le permiten implementar inteligencia artificial y nuevos métodos de modelado y (3) conectividad e interfaces de intercambio de información. Además de estas tres palancas, existe una cuarta que ya existía, pero que se está renovando a través de la medición y las capacidades computacionales: la automatización y robotización. En el presente documento, nos enfocaremos particularmente en las siguientes tecnologías y metodologías.

DATOS[7]

Los sensores, que proporcionan datos adquiridos en terreno, presentan desafíos de hardware y software. Es importante definir la naturaleza y el alcance de lo que es necesario medir y cuáles(es) son la(s) tecnología(s) de medición que se deben priorizar y cómo implementarla(s) para obtener información útil al menor costo. Las imágenes satelitales gratis (por ejemplo, de Sentinel-2), objetos conectados y aplicaciones colaborativas en teléfonos celulares son todas fuentes de datos masivos. Al procesar estos datos, podemos cuantificar los bienes deseados ya sea directa o indirectamente fusionando datos desde múltiples fuentes. Este último enfoque es una estrategia para mejorar la exactitud del valor evaluado; sin embargo, surgen múltiples temas de agregación debido a la naturaleza de las fuentes y su granularidad y precisión. El acceso a los datos presenta también un desafío: el uso de datos FAIR facilita su reutilización mientras las blockchains permiten que se compartan los datos de forma no falsificable entre los actores con intereses divergentes (como en las cadenas de valor).

7. Se debe tener en cuenta que la agricultura digital se originó en la agricultura de precisión y la producción de ganado, lo que explica por qué, en el consenso actual, la agricultura digital utiliza datos recogidos en terreno, inicialmente en el contexto de la agricultura de precisión, y no datos genómicos. Sin duda, se desarrollará una convergencia entre los dos sectores en los próximos años, en particular a través del fenotipado.

MODELADO

Este es el elemento clave en la representación de los agroecosistemas, que son intrínsecamente complejos, a fin de simularlos, optimizarlos y manejarlos. Implica distintos niveles, desde plantas y animales hasta la población humana o la cadena de valor, con un desafío adicional asociado al acoplamiento de niveles y modelos que representan los subsistemas. El modelado es un enfoque relativamente antiguo en agronomía, pero en la actualidad se está renovando a través de la tecnología digital. Por una parte, la abundancia de datos nos lleva a complementar los enfoques mecanicistas tradicionales que se basan en el análisis humano con modelos empíricos a partir del procesamiento de datos (métodos multivariados lineales o no lineales, inteligencia artificial). Por otra parte, los sistemas modelados están llegando a ser más complejos y ahora incluyen humanos. El modelado de decisión involucra, por lo tanto, conceptos adicionales (racionalidad limitada) y moviliza estructuras específicas a tener en cuenta del agente humano: sistemas de eventos discretos, sistemas basados en agentes, modelos basados en restricciones, etc. Se utiliza la simulación para representar los agrosistemas o incluso los sistemas socio-ecológicos con conductas que son difíciles de analizar. Brinda una descripción de los posibles estados que se pueden usar para varias cosas, por ejemplo, asistencia (modelos guía) en la toma de decisiones colectivas y de capacitación. La optimización va más allá en relación con el apoyo en la toma de decisiones (prescripción), ya que busca soluciones a un problema determinado de acuerdo a uno o varios criterios. Se utiliza en el control automático (gestión de dispositivos agrivoltaicos o invernaderos), robótica, toma de decisiones individuales (formulación de alimentación, planificación de cosechas, etc.) y toma de decisiones colectivas (manejo de tierra o agua, decisiones económicas, etc.). Depende de una serie de métodos para integrar más y más complejidad (métodos determinísticos, métodos metaheurísticos estocásticos, etc.) y sienta la base para varias preguntas de investigación relacionadas con la incertidumbre, la temporalidad, la complejidad de los procesos que serán modelados, etc.

EXTRACCIÓN DE CONOCIMIENTO

Además de estos métodos de modelado analítico, surgen nuevas familias de métodos, con modelos que se infieren directamente a partir de los datos cuando existen suficientes para cubrir el espacio de parámetros. Este es particularmente el caso de los datos provenientes de la teledetección o las series temporales (como aquellos que se recopilan por medio de objetos conectados. Después de una fase necesaria de procesamiento previo (preprocesamiento) que apunta a mejorar la confiabilidad de los datos (“limpiar”, comparación con datos especializados), éstos se procesan utilizando diferentes formalismos para extraer la información inteligente. Los enfoques supervisados consisten en valores predictivos (que son imposibles de medir directamente) o mediante la clasificación de datos en

distintas categorías que utilizan métodos lineales o no lineales (por ejemplo redes neuronales), que implican tener conjuntos de datos medidos y de referencia (el valor deseado). Si no están disponibles los datos de referencia, se utilizan los enfoques no supervisados (clustering, minería de patrones secuenciales). Se implementan métodos específicos para mejorar el rendimiento de los sistemas de aprendizaje (aprendizaje por refuerzo) o agregación de datos (procesamiento OLAP o proceso analítico en línea).

Los modelos extraen o generan el nuevo conocimiento y lo formalizan y organizan para ponerlo a disposición de diferentes usuarios a través de los sistemas de apoyo en la toma de decisiones adaptados a cada actividad, ya sea cultivos o producción de ganado, y en todos los niveles. Se requieren nuevas ontologías para crear interfaces ergonómicas que permitan que este conocimiento se comparta, vincule y utilice, apuntando especialmente a las nuevas oportunidades que ofrece la Web Semántica.

ROBÓTICA

Los sistemas automatizados o robóticos son otro aspecto de la tecnología digital que se están tornando cada vez más exactos y confiables. La robótica se desarrolló inicialmente en el sector ganadero (robots de ordeña fija, robots de limpieza en ambientes cerrados), pero presenta desafíos adicionales en la producción de cultivos (medio ambiente exterior cambiante o no controlado). Algunos problemas actuales incluyen el uso de GPS, el tema de la localización de bajo costo seguro y preciso, la seguridad de los robots móviles (que evitan colisiones, siendo capaces de salvar obstáculos) y modos de cooperación entre humanos y robots, animales y robots e incluso robots terrestres y drones.

La tecnología digital ofrece oportunidades para la agroecología y la alimentación sostenible

La tecnología digital, en la dirección correcta, tiene el potencial de hacer accesible muchas oportunidades para responder a los desafíos de la transición agroecológica (AET), mejorar la integración hacia los ecosistemas de agricultura verticales (aguas arriba – aguas abajo) y horizontal (territorial) e incrementar la capacidad de los agricultores para la acción.

MEJORA EN LA PRODUCCIÓN

Los dispositivos para ayudar al agricultor en los niveles sensoriales (sensores), cognitivos (DSS para los “sistemas de apoyo en la toma de decisiones”) y físicos

(máquinas) podrían mejorar los métodos de producción. Hoy en día, el concepto de agricultura de precisión o producción de ganado de precisión generalmente está asociado a la agricultura intensiva. No obstante, es válido en la agroecología, especialmente para el monitoreo y la salud de las plantas y animales mediante observaciones automatizadas a partir de sensores y modelos y para implementar procesos de cultivo más complejos (policultivo, agricultura selectiva, etc.) a gran escala. Esto requiere que los sensores y los modelos capaces de analizar la señal recibida entreguen ya sea una descripción del estado, una predicción del estado futuro o una prescripción. Más allá de la decisión táctica detrás de la intervención, algunos modelos pueden ayudar en la toma de decisiones estratégicas para la organización de la producción, una fase que es particularmente delicada en cuanto a los procesos de transición (AET, cambio climático) y la toma de decisiones con múltiples objetivos. Como asistentes físicos para reducir dificultades, los robots pueden entregar soluciones para los requerimientos muy específicos de los nuevos sistemas de cosecha (multicultivo, sistemas agroforestales) y sistemas de ganado (robots de ordeña para la ganadería pastoril). Sin embargo, la mejora en la producción también requiere la construcción de conocimiento de antemano sobre estos sistemas nuevos, diversos y complejos. La construcción de conocimiento esencial para AET podría beneficiarse de tres palancas digitales interconectadas: (i) representación de estos sistemas complejos, (ii) recopilación masiva (y potencialmente participativa) de datos sobre nuevos métodos en la producción agrícola y ganadera (fenotipado en granjas) e (iii) inferencia de nuevos modelos a partir de los datos.

CÓMO MEJORAR LA INTEGRACIÓN EN EL ECOSISTEMA

La tecnología digital podría ayudar a renovar el ecosistema agrícola, incluyendo los servicios agrícolas (seguros, asesoramiento), la organización de las cadenas de valor y el manejo de los territorios agrícolas. Las cadenas de valor están siendo transformadas por la desintermediación –impulsada por el internet– y la posibilidad de transparencia de los productos, lo que es valorado cada vez más por los consumidores actuales. Las *blockchains*, que a menudo se evocan como una forma de garantizar esta transparencia, aún plantean múltiples problemas técnicos y de gestión. El manejo territorial es otro aspecto del ecosistema agrícola que es impactado por la tecnología digital. El nivel territorial involucra tanto la agroecología (ecología del paisaje, cierre de ciclos por medio de la economía circular) y la agricultura, que juega un papel central en los territorios y es objeto de tensiones vinculadas al uso de los recursos (tierra, agua) y el papel que juega en los servicios ecológicos. La tecnología digital podría ofrecer herramientas para identificar mejor los flujos materiales y facilitar la mediación y la toma de decisiones colectiva (modelos de apoyo, etc.).

CÓMO MEJORAR EL INTERCAMBIO Y EL APRENDIZAJE

La conectividad que ofrece la ciencia y la tecnología digital facilita el intercambio y el aprendizaje individual y colectivo, ambas fuentes de innovación en agroecología. El conocimiento (incluido el conocimiento tradicional) se capitaliza e intercambia entre pares, ya sea directamente (redes sociales) o a través de procesos colectivos participativos en los que la tecnología digital juega un papel cada vez más importante (Digital Farmers Field School[8]). Los enfoques participativos que presentan un objetivo innovador (innovación abierta, laboratorios vivientes) tienen la posibilidad de mejorar con tecnologías que faciliten la capitalización, la representación, la expresión y el procesamiento de datos, y que puedan rastrear la contribución de cada individuo. Por último, el agricultor podría convertirse en un proveedor de datos para actores privados o públicos (investigación a través de la experimentación en granjas, documentación territorial, etc.), lo que podría cambiar su estado hacia una mejor integración y reconocimiento.

OPORTUNIDADES EN EL SUR GLOBAL

La mayoría de las organizaciones y patrocinadores internacionales ven la tecnología digital como una fuente importante de transformación en el Sur Global, particularmente en África. La tecnología digital podría ayudar a diversificar la economía de servicios, acelerar la transformación estructural de la agricultura y hacerla más atractiva para los jóvenes, mejorar las cadenas de valor a nivel local (a través de sistemas alimentarios territoriales) y de larga distancia (garantizando la trazabilidad del producto) y ayudar a construir el capital de información de territorios. Sin embargo, aún existen problemas técnicos relacionados con los puntos débiles de la cobertura de red, la falta de infraestructuras, el punto débil de los sistemas informáticos y la consideración de la diversidad de idiomas o incluso el analfabetismo en las interfaces Hombre-Máquina. La tecnología digital también plantea temas políticos, económicos y sociales.

Riesgos identificados que se deben evitar

Por supuesto que el desarrollo de la tecnología digital en la sociedad y los cambios que genera conlleva riesgos intrínsecos. El sector agrícola no es la excepción y se plantean muchas interrogantes sobre si la agricultura digital puede satisfacer las expectativas, qué dificultades se pueden encontrar y qué vulnerabilidades podría acentuar.

8. Witteveen, L., Lie, R., Goris, M., Jane Ingram,V. (2017) *Design and development of a Digital Farmer Field School. Experiences with a digital learning environment for cocoa production and certification in Sierra Leone.* Telematics and Informatics 34(8), DOI: 10.1016/j.tele.2017.07.013

El primer riesgo identificado es no responder a la demanda de una agricultura más ecológica. Si bien el desarrollo de la tecnología digital en la agricultura ofrece soluciones para reducir insumos, este beneficio podría estar acompañado de un bloqueo tecnológico (technological lock-in) que dificultaría la implementación de prácticas alternativas más radicales y sistémicas, o del establecimiento de métodos alternativos organizacionales que pudiera ofrecer mayores beneficios ambientales y socioeconómicos. Además, la introducción generalizada de interfaces digitales entre granjeros y animales o plantas, en un contexto de creciente tecnologización de la producción agrícola, también podría debilitar las conexiones con la naturaleza (en particular, la conexión hombre-animal). Sin embargo, la sociedad actual claramente busca un tipo de agricultura que esté más conectada con el mundo vivo que nos rodea. Por último, la tecnología digital tiene una huella ecológica definida, que aún es poco conocida en la agricultura, y el aumento de equipos y operaciones para la captura, transferencia, almacenamiento y cálculo de datos podría empeorar el impacto ambiental.

Otro grupo de riesgos a considerar se refiere a las consecuencias sociales de reforzar, a través de la tecnología digital, una trayectoria de industrialización y la concentración de producción en unidades y explotaciones agrícolas incluso más grandes que están impulsadas hacia la productividad. Este movimiento correría el riesgo de excluir formas minoritarias de agricultura, principalmente granjas que operan a una escala económica más pequeña. El desarrollo de la robótica puede contribuir a relaciones laborales precarias en la agricultura, especialmente para poblaciones de trabajadores migrantes de escasos recursos. Las dificultades de acceso a la tecnología digital también podrían ser un factor de exclusión en la agricultura, ya sea a nivel individual (falta de habilidades) o territorial (infraestructura digital subdesarrollada). La digitalización podría afectar la autonomía de los agricultores en la toma de decisiones (uso de DSS) o incluso el sentido de su profesión, con el temor de convertirse en meros "trabajadores de datos". Otra cuestión relacionada con la digitalización es el cambio en las relaciones de poder entre la actividad agropecuaria y sus sectores aguas arriba y aguas abajo. Aguas arriba, las tecnologías digitales podrían afectar la comprensión y el uso de las herramientas de producción debido a su creciente complejidad, lo que dificultaría cada vez más el mantenimiento y la capacitación, y potencialmente puede llevar a la dependencia de ciertos insumos específicos[9] aguas abajo. Las nuevas tecnologías de datos podrían cambiar el rol que juegan ciertos actores (como las empresas del sector digital) en las cadenas de valor, con consecuencias en términos de intercambio y gobernanza y el riesgo de formas de creación de subsidiarias impulsadas por actores aguas abajo. Por último, se deben considerar

9. Un paralelismo interesante es el del bloqueo de "impresora/tinta": las impresoras se venden a un precio muy bajo, pero requieren tinta de la misma marca para poder usarlas, la que a su vez se vende a un precio muy alto..

las preocupaciones que suscita la tecnología digital para el asesoramiento agrícola y sus actores, métodos, contenidos y legitimidad.

El tercer grupo de riesgos identificados tiene que ver con la soberanía digital y de alimentos. La creciente digitalización en la cadena alimenticia pudiera más adelante incluir a la agricultura con el surgimiento de actores y herramientas monopolistas. Además de esto, la soberanía digital implica el control de datos y existe el riesgo de que los proveedores de tecnología o servicios digitales (equipamiento agrícola, empresas de tecnología agrícola (AgTech), gigantes digitales, etc.) se apoderen de los datos agrícolas. Por lo tanto, el intercambio de datos agrícolas, que es una prioridad para la innovación, debe estar estructurado y se debe aclarar la gobernanza de los mismos. Finalmente, también hay que tener en cuenta los riesgos de ciberseguridad, como posibles ataques a través de objetos conectados (sensores, robots, etc.), la disponibilidad de sistemas de geolocalización y el desafío de prevenir la piratería o hackeo (robo, daño, destrucción) de datos agrícolas. Nuestros sistemas alimentarios, que se han mantenido relativamente intactos hasta ahora, son de vital importancia. Esta situación podría convertirlos en potenciales objetivos más adelante.

Por último, la digitalización del sistema agroalimentario puede incrementar la dependencia de los recursos entre los diferentes actores del sistema y crear nuevas dependencias con quienes producen y poseen estas tecnologías. Esta situación puede acentuar las vulnerabilidades del sistema frente a las múltiples dificultades que sin lugar a dudas calarán fuerte en el funcionamiento de nuestras sociedades en las próximas décadas. En términos más generales, se debe señalar que la agricultura y sus sectores aguas arriba y aguas abajo forman un sistema sociotécnico complejo cuyo costo total energético está aumentando. Es importante que este costo no sea mayor a los beneficios anticipados de la digitalización. El desarrollo de la tecnología digital también puede amplificar la dinámica de una mayor complejidad, y no se debe permitir que desencadene una carrera tecnológica precipitada que nos encerraría en una espiral de complejidad sin control.

Desafíos en el desarrollo de la tecnología digital para la agricultura del mañana

El aprovechar las oportunidades que ofrece la tecnología digital para la agroecología y las cadenas de valor rebalanceadas, identificando y anticipando riesgos, también plantea desafíos científicos, técnicos, económicos, organizativos y políticos. Nos centraremos en detalle tanto en los desafíos científicos y técnicos como en los desafíos humanos asociados para responder a cuatro tipos principales de problemas para el sistema alimentario sostenible: (i) mejorar la gestión colectiva e incorporar el nivel territorial, (ii) mejorar la gestión de las granjas, (iii) reequilibrar la cadena de valor entre sectores aguas arriba y aguas abajo y (iv) crear y compartir datos y conocimientos.

GESTIÓN COLECTIVA

Esto genera nuevas necesidades: (i) recoger datos a nivel territorial (mientras se gestiona el equilibrio entre especificidad, alcance de medición, resolución y la heterogeneidad de datos de múltiples fuentes, (ii) visualizar estos datos y los resultados posteriores al procesamiento para audiencias no especialistas (elucidando conceptos complejos como incertidumbre, omisiones), (iii) enriquecer los métodos de ingeniería territorial para facilitar la participación y abrir la innovación (necesidad de modelos de apoyo, gamificación, herramientas de análisis para sesiones participativas), toma de decisiones colectivas (herramientas digitales para la deliberación, negociación y procesos de votación) y mediación (creación de "objetos limite" digitales como, por ejemplo, modelos de apoyo para fomentar el diálogo entre las principales partes interesadas.

GESTIÓN DE UNA EXPLOTACIÓN AGRÍCOLA INDIVIDUAL

El objetivo es aumentar las capacidades perceptivas, cognitivas y físicas de los agricultores. Para la percepción, existe la necesidad de una geolocalización segura y altamente exacta, sistemas de advertencia temprana para problemas en plantas o animales, sensores frugales, no costosos y no invasivos, procesamiento de datos distribuidos para limitar la transferencia, fusión de datos heterogéneos para construir indicadores relevantes y estrategias de reducción de incertidumbre. Con respecto a la toma de decisiones, los desafíos de investigación se relacionan con varios aspectos de la construcción del modelo: representar sistemas socio agroecológicos complejos y extensos (modelado multiescala y multitemporal, integración de interacciones, el concepto del gemelo digital), incorporar expertos en conocimiento de modelos (conocimiento del ambiente, elecciones estratégicas), construcción de DSS centrados en el usuario (información inferida de personalización, creación de modelos de evolución, garantía de funcionamiento correcto de la recomendación realizada, adaptación de la interfaz de usuario a los aspectos

específicos del trabajo agrícola), manejo de incertidumbre y su divulgación. En la robótica, aún existen desafíos que se deben abordar respecto de la percepción de la escena y la interpretación en un entorno dinámico (es decir, el análisis de imágenes y otras "percepciones" realizadas por el robot), manipulación móvil y coordinación con un transportador en movimiento, interacción hombre-máquina y autonomía compartida, solidez de funcionamiento y adaptación a los nuevos sistemas de producción y, además de estos aspectos técnicos, cuestiones en el campo de las humanidades sobre el vínculo entre la robótica y la transformación del trabajo.

EL ECOSISTEMA AGRÍCOLA Y LAS RELACIONES CON LOS PRINCIPALES ACTORES

En el sector agrícola aguas arriba, los servicios se podrían mejorar a través de la tecnología digital, al desarrollar un asesoramiento "digital" más personalizado, lo que requeriría incorporar las características de la granja, así como las preferencias potenciales y las del agricultor y los modelos subyacentes. Las pólizas de seguros se podrían mejorar mediante la creación de indicadores nuevos y más justos basados en datos recopilados automáticamente (teledetección, objetos conectados). En el sector aguas abajo, la reconexión de los agricultores con los consumidores podría ser mejor a través de soluciones digitales simples que aumenten la transparencia (información sobre los productos) y la mejora de las plataformas. Las *blockchains* podrían ser una solución en respuesta a la demanda de transparencia, trayendo consigo desafíos aún más técnicos (vínculo entre el flujo de información y los flujos físicos, acoplamiento entre *blockchains* públicas y privadas, impacto ambiental de las cadenas de *blockchains* públicas, integración de datos para su reutilización) y desafíos institucionales (¿cómo se deben regular las *blockchains*? La "plataformización" de la tecnología y la desintermediación plantean otros desafíos: la planificación de la producción entre múltiples granjeros (que satisfagan las necesidades urbanas o de restauración de la producción); la coordinación de los actores dentro de los "food hubs" (centros de alimentos) que agrupan diferentes productos; desarrollo de soluciones logísticas para la producción periurbana. En el Sur Global, estos problemas son fundamentales para evitar pérdidas posteriores a las cosechas, que se ven agravadas por condiciones climáticas específicas.

HERRAMIENTAS PARA EL INTERCAMBIO DE DATOS Y CONOCIMIENTO

Los datos y el conocimiento serán el núcleo de cualquier sistema digital diseñado para el fomento de la agroecología, si se abordan los desafíos científicos, tecnológicos, regulatorios, organizacionales e institucionales asociados con su intercambio. Habrá un mayor volumen de datos participativos disponibles (tanto de profesionales como de los que no lo son), lo que generará dudas sobre

la calidad de los datos, la estimación y el cálculo del valor producido y el reconocimiento del papel de los actores en la innovación resultante. ¿Qué formas de regulación debieran usarse para estos datos en el contexto de reutilización? ¿Cómo se puede apoyar una circulación de datos virtuosa y segura que evite la apropiación de poder por parte de un solo actor? En cuanto al conocimiento –que necesita ser construido en conjunto (participativo, juegos serios, etc.) y formalizado– se plantea la interrogante con respecto a los bienes comunes digitales y la recopilación y conexión de experiencia a través de ontologías que requerirán integración y alineamiento.

EN CONCLUSIÓN, TODA LA INVESTIGACIÓN EN AGRICULTURA DIGITAL SE VERÁ APUNTALADA POR LOS DESAFÍOS TRANSVERSALES

La investigación dirigida a construir tecnología digital responsable para una agricultura sostenible debe incorporar absolutamente (i) una visión sistémica de la agricultura y la tecnología digital (que tome en cuenta los impactos de la tecnología), (ii) la búsqueda de la frugalidad (para reducir el impacto ambiental y el costo económico) , (iii) la búsqueda de la resiliencia más que de la optimización económica en los sistemas alimentarios y la protección de la autonomía de los agricultores y (iv) la ciberseguridad (ataques a través de la IoT, secuestro de datos, interferencia de geolocalización, etc.), un tema aún más urgente por cuanto que afecta la soberanía alimentaria.

Conclusión general

La transición de los sistemas alimentarios y la agricultura hacia métodos más sostenibles (agroecología, sistemas alimentarios territorializados, cadenas largas rebalanceadas, etc.) en un contexto de cambio climático es uno de los mayores desafíos para los próximos años. La tecnología digital se está implementando rápidamente en la agricultura y, si bien puede brindar soluciones, también puede contribuir a dañar los frágiles equilibrios. Puede acompañar y acelerar transiciones virtuosas, pero es esencial para anticipar y evitar las trampas de su mal uso. Los desafíos de la investigación más pertinentes se refieren a: adquisición de datos en diferentes niveles y problemas de gobernanza asociados; dispositivos para ayudar a los agricultores a nivel cognitivo (apoyo en la toma de decisión), sensorial (adquisición y transmisión de información) y físico (herramientas, robots y "cobots"[10]); el modelado de estos sistemas complejos y la gestión de la incertidumbre asociada; herramientas digitales para fomentar procesos participativos (esencial en AET); la trazabilidad y el uso de los datos entre los consumidores y, por último, el tema

10. Elementos robóticos que trabajan colaborativamente con los humanos.

clave de la ciberseguridad por el hecho de que la producción agrícola atañe a la soberanía alimentaria. El enfoque adoptado jugará un papel fundamental en la construcción de tecnología digital responsable para los agricultores: la posición de investigación prioritaria podría utilizar el marco de la investigación e innovación responsables (RRI, por sus siglas en inglés), que está comenzando a surgir en la agricultura digital y requiere un grado de trabajo interdisciplinario y transversal. Por último, es importante recordar que existen varios modelos agrícolas y el futuro traerá aún más diversidad, lo que llevará al desarrollo de ofertas digitales adaptadas a cada modelo y sus necesidades.

1

Introducción

En todo el mundo, los sistemas alimentarios, es decir "las formas en que los humanos se organizan, en espacio y tiempo, para obtener y consumir sus alimentos" (Malassis, 1994) están pasando por profundos cambios a causa de las presiones externas (cambio climático, organización en la cadena de valor, etc.) y factores intrínsecos (innovación, reducción en la cantidad de agricultores, etc.). Los patrones de consumo están cambiando debido a cinco tipos de factores: (i) factores demográficos y de estilo de vida, (ii) factores económicos, (iii) factores culturales y de valor, (iv) factores tecnológicos y (v) factores regulatorios (Blezat consulting et al., 2017). A nivel mundial, "la principal preocupación acerca del futuro de la alimentación y la agricultura es saber si estos sistemas serán capaces de alimentar a todos en forma sostenible y eficiente más allá del 2050, al tiempo que se satisface la demanda adicional de productos agrícolas para usos no alimentarios" (FAO, 2018a). Sin embargo, si bien la seguridad alimentaria es la principal preocupación a nivel mundial, la agroecología[11] , y particularmente su despliegue a gran escala, incluidas las pequeñas granjas, también es un punto a destacar por la FAO (FAO, 2018b). Preservar la agricultura familiar y las estructuras rurales vivas es fundamental para generar más interés por las profesiones agrícolas, otro problema que se ve en todo el mundo. En Francia, la agricultura recurre a la transición agroecológica para aumentar su resiliencia (adaptación al cambio climático), reducir su impacto ambiental (menos pesticidas, antibióticos, fertilizantes, etc.), respetar el bienestar animal y garantizar ingresos dignos a los agricultores.

Paralelamente a estos grandes cambios en los patrones de producción y consumo de alimentos, está emergiendo otro fenómeno en los sistemas alimentarios, al igual que en todos los sectores de la economía: el despliegue de la tecnología digital que ofrece "tecnología versátil que está transformando procesos y la vida en todas las áreas del planeta" (Scholz et al., 2018). Esto se conoce como agricultura digital.

La "agricultura digital" se refiere a una forma de agricultura y, además, a un sistema alimentario "que utiliza tecnología de la información y comunicación (ICT, por sus siglas en inglés): tecnologías para la adquisición de datos (satélites, sensores, objetos conectados, teléfonos inteligentes, etc.), transferencia y almacenamiento de datos (cobertura 3G/4G, redes satelitales o terrestres de baja velocidad, nubes) y procesamiento remoto o incorporado (supercomputadores

11. Usamos aquí la definición de (Caquet et al. 2020): "La agroecología es a la vez un campo científico, una práctica y un movimiento social. [...] La agroecología es, ante todo, un nuevo paradigma que pretende aprovechar los procesos biológicos para satisfacer tanto las expectativas de producción agrícola como otros servicios ecosistémicos de los agrosistemas: proteger los recursos, ayudar a mitigar el cambio climático, preservar los hábitats y los patrimonios culturales." [Traducción libre].

accesibles a través de comunicación de muy alta velocidad) [...] en cada nivel de la producción agrícola y su ecosistema, ya sea en la granja (optimización de operaciones de cultivo, manejo de rebaño, etc.), en servicios de apoyo (nuevos servicios de asesoramiento agrícola basados en datos recopilados automáticamente), o más ampliamente a nivel territorial (gestión del agua) o en la cadena de valor (al mejorar los insumos tales como las semillas[12], la armonía entre la producción y el mercado, etc.)" (Bellon-Maurel and Huyghe, 2016). Es importante precisar que actualmente existe consenso mundial sobre la definición de agricultura digital, que se basa esencialmente en la multiplicación de datos recopilados en terreno, el rol de la inteligencia artificial, así como en la conectividad y la automatización. Hoy, este consenso no incluye la genómica, donde los datos se recopilan en el laboratorio. Por lo tanto, no abordaremos este campo de manera deliberada en el presente documento. Se establecerán conexiones entre estos dos temas en la conclusión (en particular, en relación con las ventajas de recopilar datos muy precisos para caracterizar el medio ambiente).

La tecnología digital se utilizó por primera vez en la agricultura hace unos 50 años (satélites, luego capacidades informáticas, GPS, etc.) y se ha generalizado con los nuevos sistemas de adquisición de datos (satélites Sentinel, objetos conectados y la Internet de las Cosas (IoT), fenotipado de alta velocidad, trazabilidad de cadena de producción) y la explosión de capacidades de procesamiento. El término "agricultura digital" fue acuñado a principios de la década de los 2000, mientras que el concepto de agricultura de precisión ha existido en la literatura desde mediados de la década de los 90. El número de artículos (revistas y conferencias) sobre agricultura digital (con el término "Agricultura Digital" en el título, palabras clave y resumen) se estancó en menos de diez por año hasta 2017, cuando comenzó a aumentar exponencialmente con 59 publicaciones en 2019 (en comparación con 1.000 publicaciones sobre la agricultura de precisión), incluidas 6 en una edición especial de NJAS (Wageningen Journal of Life Sciences), y 94 publicaciones en 2020. Por lo tanto, el concepto aún está en la primera etapa de su desarrollo, incluso en la investigación. En el ámbito político, éste comenzó a llamar la atención entre 2010 y 2015, con informes de expertos y posiciones políticas a favor del desarrollo de la tecnología digital en la agricultura, ya sea en EE. UU. (The Hale Group & LSC, 2014), Francia (el informe de

12. El mejoramiento de semillas es un vasto campo que abarca la genómica (conocimiento del potencial genético), el fenotipado (medición de la expresión de este potencial) y las relaciones entre los dos. La agricultura digital adopta un enfoque hacia la mejora genética basada en el fenotipado debido a las posibilidades mejoradas de caracterización de plantas o animales, generadas por nuevos sensores. No incluye la investigación genómica, que se lleva a cabo aguas arriba.

"Innovación en la Agricultura de 2025" en 2015)[13], Europa (la declaración de "Un futuro digital sostenible para la agricultura y las áreas rurales europeas" en 2019)[14] , o en cualquier parte del mundo (Dinash et al., 2017; FAO, 2019; OCDE, 2019). En Francia, la tecnología digital, los objetos conectados, la agricultura de precisión y el uso de datos se han identificado como tecnologías clave en el ámbito de la agricultura y la agroalimentación (DGE, 2019).

El desarrollo de la tecnología digital en la cadena agroalimentaria está resultando inevitable y muchas veces es visto por gobiernos y expertos como una oportunidad para contribuir a los cambios en la agricultura para beneficio los agricultores, los consumidores y la sociedad en general. ¿Cuál es el meollo del asunto? ¿Cómo pueden los institutos de investigación como INRAE e Inria acompañar este cambio?

Este libro blanco apunta a abordar estas interrogantes. Numerosas publicaciones ya las han analizado en los últimos años, pero aún existen pocos libros blancos (los ejemplos más extensos son Isaac y Pouyat, 2015 y Scandurra et al., 2020, entre otros). La originalidad de este libro blanco será estudiar en qué medida la tecnología digital puede contribuir a la agroecología y cómo se puede orientar la investigación en esta dirección. De igual forma, intentará responder a la siguiente interrogante: ¿qué temas de investigación se deben abordar para comprender, dominar, preparar y apoyar la implementación de la tecnología digital en la agricultura y la cadena alimentaria, teniendo en cuenta la forma en que transformará los sectores y sus ecosistemas, con el fin de ponerla al servicio de la agricultura, los agricultores y el bien común? Hemos optado por concentrarnos en las necesidades de investigación y no abarcar el campo de la innovación, que es muy dinámico cuenta con numerosos emprendimientos –y, por lo tanto, muy fluido–, ya que el documento quedaría obsoleto rápidamente. En particular, estudiaremos el papel que puede jugar la tecnología digital en el desarrollo de la agroecología y los sistemas alimentarios sostenibles. Con este libro, nuestro objetivo es proporcionar una visión general de la situación actual y proponer caminos que, esperamos, nos lleven colectivamente hacia la investigación responsable y la innovación en la agricultura digital (Owen et al., 2012).

13. https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/rapport-agriculture-innovation2025.pdf
14. Disponible en https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/eu-member-states-join-forces-digitalisation-european-agriculture-and-rural-areas

Este libro blanco está estructurado de la siguiente manera: en primer lugar, presenta los desafíos de la transformación de las cadenas agrícolas y alimentarias, luego brinda una descripción general del estado de arte y la tecnología existente. Por último, explora las oportunidades que ofrece la tecnología digital en términos generales y los riesgos asociados a un desarrollo descontrolado de la agricultura digital. Finalmente, las reflexiones centrales destacan los problemas técnicos y los desafíos que surgen en el desarrollo de la agricultura digital del futuro y, en particular, aquellos que podrían movilizar a los equipos de investigación de nuestros dos institutos.

2

¿Cuáles son los desafíos que enfrenta la agricultura?

Autores – *Benoît Dedieu, Emmanuel Prados.*

Reconocimientos (contribución, corrección de estilo, edición) – *Véronique Bellon-Maurel, Ludovic Brossard, Frédérick Garcia, Nathalie Mitton, Alexandre Termier.*

La agricultura ya está enfrentando múltiples desafíos. Estos tienen que ver con la seguridad alimentaria, el impacto medioambiental de la agricultura y la organización del sector. ¿Puede la tecnología digital ayudar a construir un futuro deseable a fin de responder a estos temas?

2.1 La seguridad alimentaria mundial sometido a presión

La población en el mundo está creciendo a una tasa anual de 1,1 % y se espera que alcance alrededor de 9,5 mil millones de personas en 2050, según el escenario promedio de las Naciones Unidas. Este crecimiento de la población genera un aumento considerable en la demanda global de alimentos que también se ve acelerada por el rápido crecimiento y la dieta cambiante en China (Bai et al., 2020). Los sistemas agroalimentarios en el mundo están cada vez más sujetos a restricciones, especialmente debido a su dependencia de algunos recursos no renovables que son cada vez más escasos y presentan cada vez más daños (agua potable, fósforo, petróleo, suelo cultivable, etc.). Este sistema pronto sentirá toda la fuerza del impacto del cambio climático tanto directa (eventos climáticos extremos, sequía etc.) como indirectamente (derretimiento de glaciares, proliferación y diseminación de especies dañinas de organismos y enfermedades, aumento de los niveles del mar) (IPCC, 2014; UNESCO, 2019). De igual forma, el sistema está siendo amenazado por el colapso actual de la biodiversidad en las semillas, los polinizadores, los asistentes de cultivos, etc., que dañan muchos servicios de ecosistemas necesarios para su adecuado funcionamiento (FAO, 2019a). Los conflictos en el uso de productos, de la tierra y el agua también aumentarán, por ejemplo, con el uso de biomasa para energía y la implementación de los programas de aforestación/reforestación para capturar CO2 (también conocido como técnicas de "emisiones negativas" que en la actualidad menoscaban todos los escenarios IPCC que limitan el aumento de la temperatura a 2°C). Más aún, para algunos cereales considerados críticos[15] para la seguridad alimentaria, los rendimientos agrícolas parecen haber alcanzado sus límites en los países desarrollados[16]. Por último, el actual sistema agroalimentario no es muy resiliente. Depende, por ejemplo, de recursos globalizados que no están distribuidos equitativamente en el mundo (fósforo, petróleo, etc.) y una amplia gama de sistemas exógenos potencialmente frágiles como transporte "justo a tiempo" y sistemas logísticos,

15. Es decir, que son la base de las dietas.

16. Por ejemplo, véase los análisis de la Academia Francesa de Agricultura sobre la evolución de la producción anual promedio de trigo en Francia desde 1815 a 2018 y la de maíz desde 1960 a 2017.

mercados globales y financieros (especulación, volatilidad en los precios, etc.) y flujos de trabajadores migrantes estacionarios. La crisis de salud del Covid-19 ha destacado algunas de estas vulnerabilidades[17].

La creciente tensión entre la oferta y la demanda conlleva a un riesgo de escasez alimentaria mundial en el mediano plazo con consecuencias geopolíticas múltiples (Brown, 2012). Las últimas estadísticas de la FAO muestran que la hambruna está en alza nuevamente (FAO, 2017). Sin embargo, ciertas palancas y oportunidades podrían potencialmente tener un impacto positivo, tales como el cambio en los hábitos alimenticios en los países desarrollados, la reducción drástica de pérdidas y desechos (FAO, 2019b), capacidades para reciclaje y uso de sub-productos/co-productos y la mejora de las técnicas de producción y organizaciones en los sistemas agroalimentarios para aumentar su resiliencia y capacidad de adaptación. Si bien estas palancas probablemente están dentro de nuestro alcance, es crucial movernos hacia adelante con mucha rapidez en estos temas.

Junto con estos temas de seguridad alimentaria, la OMS ha observado que el 13% de los adultos en el mundo es obeso. Este aspecto de la desnutrición es otro tema crítico para el sistema agroalimentario junto con el desarrollo de las enfermedades crónicas relacionadas (cáncer, diabetes, eventos cardiovasculares) a través de la producción de alimentos ultra procesados que a menudo tienen un contenido muy alto de azúcar. Lo mismo ocurre con el uso de antibióticos como promotores del crecimiento en ciertos modelos de ganadería. Estos temas de salud relacionados con la alimentación son un creciente foco de atención (véase, en Francia, los États généraux de l'alimentation y la ley Égalim[18] en 2017-2018) y generan una demanda de alimentos sostenibles y saludables que sean accesibles a todos y preferentemente procesados en forma mínima, locales y agroecológicos.

17. Véase, por ejemplo, el comunicado de prensa del Cirad de fecha 29/04/2020 (https://www.cirad.fr/actualites/toutes-les-actualites/communiques-de-presse/2020/pandemie-coronavirus-menace-agriculture-alimentation) y el análisis de la asociación les Greniers d'Abondance de fecha 16/04/2020 (https://resiliencealimentaire.org/covid-19-qui-veille-au-grain-pour-demain-lanalyse).

18. Véase la edición 1566 (2017) de la revista Alim'agri del Ministerio de Agricultura y Alimentación, que resume los distintos proyectos en curso https://agriculture.gouv.fr/alimagri-les-etats-generaux-de-lalimentation. La Ley Égali (agricultura y alimentación), que deriva de este trabajo, se promulgó en 2018.

2.2 Existe una necesidad urgente de reducir los impactos medioambientales negativos de la agricultura

El sistema de producción agrícola basado en la agricultura intensiva ha contribuido fuertemente al colapso actual de la biodiversidad (Sánchez-Bayo y Wyckhuys, 2019)[19] y la reducción de la fertilidad del suelo y de la calidad del agua (Caquet et al., 2020). Existe una necesidad urgente de reducir en forma drástica el uso de los productos fitosanitarios y de los fertilizantes minerales y de reconciliar la agricultura con el medio ambiente en términos generales. Además, debemos repensar nuestras interacciones con los ecosistemas "naturales" (vida salvaje, bosques y reservas de biodiversidad pastoril), teniendo en mente que "natural" no significa excluir toda intervención y actividad humanas. Es igualmente esencial mejorar el bienestar del ganado: los animales deben ser considerados como sujetos que son tanto sintientes como conscientes, trabajando en cooperación con el granjero y ya no más considerarlos como meros objetos con funciones biológicas. Se deben diseñar sistemas de criaderos que respeten al animal y garanticen una buena vida y una muerte aceptable (Porcher, 2011).

La circulación de zoonosis (Covid-19 y otras zoonosis recientes, como por ejemplo H1N1) nos recuerda la porosidad con respecto a ciertas enfermedades entre los mundos animal –tanto domésticos como salvajes– y el humano. De acuerdo con la OIE (Organización Internacional para la Salud Animal) más del 60% de las enfermedades infecciosas humanas son zoonóticas. Esta cifra aumenta si consideramos que las interacciones de enfermedades infecciosas emergentes (70%)[20] entre la salud animal, humana y del ecosistema están llevando al concepto de "Una Salud" o "One Health" (Gibbs, 2014; Zinsstag et al., 2015).

Por último, la agricultura es la tercera fuente más grande de emisiones de gas de efecto invernadero (GEI) en Francia (19% del total nacional en 2018) (CITEPA, 2018). La maquinaria agrícola y forestal sólo contempla 12% de estas emisiones, mientras que la ganadería contempla 48% (principalmente por medio de las emisiones de metano) y los cultivos 40% (principalmente por medio de emisiones de óxido nitroso durante la fertilización del suelo). Entre 1990 y 2018, las emisiones provenientes de la agricultura disminuyeron en un 8% (las emisiones a nivel nacional de GEI aumentaron en un 6% en el mismo periodo).

19. En treinta años, casi el 80% de los insectos han desaparecido en Europa.
20. See https://www.oie.int/fr/pour-les-medias/une-seule-sante/

Por lo tanto, deben incrementarse las transformaciones y los esfuerzos si el país quiere cumplir los objetivos de estrategia baja en carbono de Francia[21] y sus compromisos en el marco del Acuerdo de París. En este contexto, los cultivos, los bosques, los pastizales, las tierras de pastoreo y los corredores podrían ser de gran ayuda ya que juegan un papel importante en el almacenamiento de carbono[22] Por ejemplo, el proyecto "4 pour 1000" (4 por 1000) lanzado por INRAE apunta a aumentar el almacenamiento de carbono en todos los suelos agrícolas del mundo en un 0,4% cada año (es decir, el equivalente de las emisiones de CO2 anuales del mundo vinculadas a las actividades humanas)[23] al desarrollar prácticas alternativas de cultivo como, por ejemplo, cultivos intermedios, agrosilvicultura entre parcelas y pastizales temporales en rotación de cultivos.

2.3 La dinámica agrícola ha favorecido la intensificación y la especialización

La agricultura es parte de las cadenas sectoriales en donde se diseña y se deciden los modelos de producción y procesamiento agrícola, pero también donde se transforman y se inventan. En todos los niveles de la cadena, el modelo agroalimentario impone requerimientos costosos para la competitividad y los estándares sanitarios vinculados a los procesos y la logística del producto. Estas cadenas son parte de los regímenes sociotécnicos[24] centrados en la competitividad a través del precio (hacerlos lo más bajo posible). Una mayor productividad de mano de obra a través de la sustitución de esta última por capital (en máquinas cada vez más eficientes e instalaciones automatizadas y climatizadas) y la competencia de fuerza laboral exacerbada por la globalización ha hecho esto posible. Este sistema se ve menoscabado por el uso intensivo de tecnología cada

21. La estrategia SNBC 2018-2019 tiene como objetivo reducir las emisiones del sector agrícola en un 18% con respecto a 2015 para 2030 y en un 46% para 2050. Su objetivo es una reducción global de las emisiones de gases de efecto invernadero en un 40% para 2030 (en comparación con 1990) y la neutralidad de carbono, es decir, cero emisiones netas, para 2050.

22. Por ejemplo, según la ONF, los bosques almacenan el equivalente al 15% de las emisiones nacionales de GEI.

23. La iniciativa "4% sur les sols pour la sécurité alimentaire et le climat" (4% sobre los suelos para la seguridad alimentaria y el clima) lanzada por Francia con ocasión de la Conferencia Climática de Paris (COP-21), propone aumentar el inventario de carbono en los suelos del mundo en un 0,4% al año. Esta cifra es el resultado de un cálculo simple inicial, considerando que las emisiones totales anuales de CO2 de las actividades humanas son el equivalente a 0,4% del stock de carbono (C) de los suelos del planeta (aproximadamente 2.400 gigatoneladas de C). Por lo tanto, un almacenamiento anual del 4 por 1000 (4% o 0,4%) en toda la profundidad del suelo compensaría estas emisiones

24. De acuerdo con Geels (2002) y el modelo de "perspectiva multinivel": un régimen es una red formada por diferentes actores económicos y sociales en torno a un producto, servicio o, en nuestro caso, un modelo agrícola. Las partes interesadas son actores privados y cooperativos de las cadenas, pero el sistema puede verse fortalecido por la docencia, la investigación, el sistema de asesoría a las granjas, las políticas nacionales o europeas, etc., ya sea de manera deliberada o no.

vez más sofisticada, de la cual muchos usuarios están dependiendo cada vez más (maquinaria agrícola, biotecnología, pesticidas, etc.). Entre otras cosas, a raíz de esto se ha producido un descenso constante en el empleo agrícola en todos los países de la OCDE, incluyendo Francia[25], y la especialización por parte de un número creciente de granjas en un único tipo de producción. A través de la política agrícola común (Common Agricultural Policy o CAP, por sus siglas en inglés), las organizaciones compradoras y las multinacionales oligopolistas, la organización de este sistema, desde la explotación agrícola individual al consumidor, es impulsada por tensiones y relaciones de poder desbalanceadas entre actores con intereses diferentes y a veces divergentes, lo que contribuye a bloqueos. Más aún, la actividad agrícola sucede en territorios que, en muchos casos, se han especializado, llevando, por ejemplo, a la disociación espacial de producción de ganado y de cultivos y la concentración geográfica de sectores. Todo esto forma un sistema altamente complejo caracterizado por la especialización y la interdependencia de cada elemento en los diferentes planos, lo que exige niveles muy altos de recursos. Las inestabilidades se amplifican y se multiplica el riesgo de fracaso. De igual forma es un obstáculo para el cambio.

2.4 ¿Cuáles son los modelos agrícolas del futuro?

Existe un debate sobre qué modelos agrícolas responderían mejor a los desafíos actuales, especialmente desde el auge de la agricultura orgánica en Francia (que ahora representa el 8% de la superficie agrícola) y la promoción de la agroecología. Estos debates no se limitan al marco nacional, sino que han adquirido una dimensión internacional. En 2016, el panel de expertos de alto nivel (HLPE, por sus siglas en inglés) de la FAO propuso abordar el futuro de la agricultura (incluida la ganadería) según dos modelos estándar: la intensificación sostenible y la agroecología (HLPE, 2016). El primero coincide con las tendencias actuales a mejorar la eficiencia de los procesos y la integración en sistemas de cadena larga. Se basa en el conocimiento científico de vanguardia y los avances tecnológicos posibles gracias a la agricultura de precisión y la producción ganadera y la genómica. El segundo modelo estándar promueve la agricultura basada en procesos naturales y la integración a los sistemas alimentarios locales y soberanos. Prioriza todas las formas de diversidad (biodiversidad, diversidad agrícola e integración de la producción agrícola y ganadera), el aprendizaje entre pares y la búsqueda de sistemas coherentes que promuevan la autonomía con respecto a los insumos y el

25. En algunas zonas del mundo, particularmente en África, la dinámica demográfica y las limitadas oportunidades que ofrecen los sectores industrial y de servicios hacen que la creación de empleos en las zonas rurales y periurbanas deba considerarse como parte de los desafíos que enfrenta la agricultura. Esto también se aplica a algunas áreas interiores en Francia.

ahorro de costos. La agricultura orgánica es uno de esos enfoques (ver el recuadro sobre el metaprograma Métabio de INRAE). Este modelo cuenta cada vez más con el apoyo de asociaciones y autoridades locales que desarrollan proyectos alimentarios territoriales y apuestan decididamente a la promoción de cadenas cortas de producción. Se ha propuesto además un modelado más detallado. En particular, Therond et al. (2017), identifican ocho modelos agrícolas posicionados a lo largo de dos ejes: la dependencia de insumos frente a la implementación de servicios de ecosistemas; y el anclaje territorial de productos alimentarios frente a largas cadenas de producción.

Por ejemplo...

El metaprograma "**INRAE METABIO**" iniciado en 2019 y que propone el "cambio de escala de la agricultura orgánica", busca explorar la hipótesis de que la mayor parte de la oferta nacional de productos proviene de la agricultura orgánica, en un contexto de fuerte demanda y transición agroecológica. Estudia los retos, palancas y consecuencias del cambio de escala de la agricultura ecológica en todo el sistema agroalimentario. El objetivo es explorar propuestas respaldadas científicamente para anticipar las consecuencias e informar el despliegue del sistema agroalimentario orgánico.

Otro debate sobre los modelos gira en torno a las características estructurales de las granjas que podrían dar respuesta a los desafíos señalados anteriormente. Aquí, existe una marcada diferencia entre la agricultura familiar y los modelos más capitalistas, tales como la agricultura corporativa descrita por Gasselin et al. (2015) y Hervieu y Purseigle (2013). En el primer caso, el capital y el trabajo están en manos de la familia, mientras que, en el segundo, el capital está en manos de actores no agrícolas y todos los trabajadores son empleados. Esta última situación anticipa la megagranja[26], que se basa en una productividad muy alta y que es posible gracias a operaciones a gran escala, mecanización y una cada vez mayor automatización adaptada.

26. La granja más grande del mundo se encuentra en China, con aproximadamente 40.000 vacas lecheras; otro de tamaño incluso mayor (100.000 vacas) está actualmente en construcción... ¡mucho más grande que nuestra controvertida granja de 1.000 vacas!

Existe cierto contraste entre estos dos tipos de modelos, porque la agroecología se basa más en la familia, mientras que la intensificación sostenible se basa más en el capital. Sin embargo, la diversidad de los sistemas no puede reducirse a estos arquetipos. Existen también muchas situaciones híbridas de lo que se conoce como "agricultura del medio". Además, la oposición entre estos dos tipos en el debate social o profesional no excluye formas de coexistencia en los territorios, que pueden ser (intercambios) espaciales o basados en el trabajo, y la cadena alimentaria urbana. Cualquiera sea el modelo, los agricultores quieren un ingreso decente y condiciones de trabajo dignas (Ghai, 2003), a saber, condiciones que protegen su salud, ofrecen protección social y sigan teniendo el poder de influir en su futuro. Ellos también quieren un trabajo significativo, útil, atractivo y donde se relacionen con otros.

2.5 La naturaleza territorial de la agricultura

Otro elemento a poner en el debate sobre los modelos agrícolas es el carácter territorial de la agricultura. El tema de la inclusión territorial de los modelos responde a ciertas necesidades: el desarrollo económico y social de estos territorios, su mayor resiliencia, su calidad ambiental y la disponibilidad de oportunidades para integrar actividades que utilizan subproductos en aplicaciones locales. ¿Cómo pueden los modelos agrícolas reducir los flujos materiales y energéticos? ¿A qué escalas deben la producción y las actividades reubicarse y rediversificarse? ¿Cómo pueden las relaciones ciudad-campo, cadenas cortas y agricultura cerca de las ciudades satisfacer estas necesidades? ¿Qué estrategias y herramientas deben ser movilizadas (indicaciones de calidad geográfica tales como PDO, AOC[27], etc.)? ¿Cómo se puede promover el empleo y asegurar el valor económico suficiente? Todas estas preguntas posicionan al territorio (compuesto por sus espacios, actividades y actores) como una entidad esencial para abordar los desafíos que debe enfrentar la agricultura, en particular a través de:

- el análisis de los modos de convivencia y frontera compartida entre modelos agrícolas (Gasselin et al., 2021) en los sistemas alimentarios;
- el diseño de procesos para la transición agroecológica a nivel territorial (Bergez et al., 2019);;
- la entrega de información y herramientas para la toma de decisiones para las partes interesadas, las autoridades locales y los servicios gubernamentales interesados en las dimensiones ambientales y de salud que vinculan la agricultura con los demás componentes de los ecosistemas, hidrosistemas y patosistemas.

27. *Appellation d'Origine Contrôlée.*

Conclusión

La agricultura se enfrenta actualmente a desafíos críticos en términos de seguridad alimentaria, contaminación y recursos que ponen en tela de juicio las dimensiones productivas de la actividad y la profesión del agricultor. Plantean interrogantes sobre qué modelos agrícolas podrían dar una respuesta a los retos y sobre los propios territorios en los que interactúan, contrastan o conviven las variaciones concretas de estos nuevos modelos. Cabe señalar que están sujetos a diferentes dinámicas, dependiendo de los regímenes sociotécnicos a los que se adscriben. La intensificación sostenible a menudo se asocia con grandes granjas y una pequeña mano de obra y está vinculada a la evolución del régimen predominante heredado, lo cual se basa en (grandes) empresas privadas aguas arriba y aguas abajo, grandes cooperativas, servicios de asesoramiento proveniente de las cámaras de agricultura, la CAP y la investigación que lleva a la prescripción de soluciones técnicas aplicables en la mayoría de los entornos. La agroecología sigue siendo un nicho sociotécnico, pero se ha observado un verdadero cambio de prioridades entre múltiples actores, incluso en la investigación, la formulación de políticas públicas y la educación. Además, la agroecología está asociada a la idea de transición y trasformación radical. Hace un llamado al desarrollo de conocimientos, métodos y herramientas que exploran palancas para mejorar la coherencia y el desempeño de los sistemas agroecológicos. De igual forma, acompaña procesos de cambio y facilita la exploración de situaciones deseables, aprendizajes y mecanizaciones adaptadas. Apoya la reconfiguración paso por paso de los sistemas en un contexto de conocimiento incompleto e incertidumbre en relación al impacto de las acciones.

En este contexto, las tecnologías digitales son consideradas sobre todo desde la perspectiva de la precisión de la información que proporcionan y los nuevos regímenes de apoyo en la toma de decisiones que soportan. De esta manera, pueden revertir la dinámica de simplificación de razonamientos y acciones provocadas por el aumento del tamaño de las granjas. Al proporcionar herramientas para observar y gestionar áreas cada vez más grandes, la tecnología digital actúa como una palanca para la intensificación sostenible y la expansión de las estructuras, lo que se hace compatible con la precisión y la individualización. Al mismo tiempo, las tecnologías digitales también podrían contribuir al desarrollo del modelo agroecológico en las granjas familiares. De hecho, parte de este modelo se basa en el diálogo y el aprendizaje entre pares y en los vínculos directos con los consumidores: los foros, las tiendas en línea y las redes sociales podrían convertirse en herramientas eficaces. Más tecnología digital podría ayudar a comprender y gestionar la complejidad biotécnica, ecológica y socioeconómica de los sistemas basados en la agricultura agroecológica, aunque esto aún está por confirmarse.

También podría "equipar" al agricultor para detectar fallas con antelación y ayudar en la toma de decisiones (información de "apoyo" en la toma de decisiones).

El nivel territorial también es de interés desde la perspectiva digital, debido a la capacidad de la tecnología digital para lidiar con procesos complejos que conectan espacios, actividades y actores y para explorar escenarios útiles para la toma de decisiones de múltiples actores, ya sea que se trate de sistemas alimentarios, problemas ambientales o, cada vez más, problemas de salud (enfermedades infecciosas de los animales o zoonóticas) (Charrier et al., 2019).

En definitiva, para permitir una rápida transformación capaz de afrontar los desafíos, es necesario cuestionar la capacidad de las tecnologías digitales para dar respuesta a las demandas de los diferentes actores y partes interesadas (públicas o privadas) y sus urgentes necesidades de obtener:

- información y un entendimiento de la complejidad de los sistemas, riesgos e incertidumbres;
- apoyo para el desarrollo de estrategias y políticas y la evaluación multicriterio de escenarios de producción agrícola/sistema alimentario a diferentes niveles (europeo, nacional, regional y territorial);
- apoyo para la toma de decisiones y la gestión de concesiones en situaciones de un único actor y de múltiples actores; y, por último,
- el apoyo a componentes de acción concreta que vinculan humanos, máquinas y tareas, por un lado; y el diálogo experiencial entre pares, por el otro.

Fundamentos y situación actual

Autores – *Nathalie Mitton, Ludovic Brossard, Tassadit Bouadi, Frédérick Garcia, Romain Gautron, Nadine Hilgert, Dino Ienco, Christine Largouët, Evelyne Lutton, Véronique Masson, Roger Martin-Clouaire, Marie-Laure Mugnier, Pascal Neveu, Philippe Preux, Hélène Raynal, Catherine Rousset, Alexandre Termier, Véronique Bellon-Maurel.*

Reconocimientos (contribución, corrección de estilo, edición) – *Isabelle Piot-Lepetit.*

Tras describir los diferentes desafíos que enfrenta la agricultura en el capítulo anterior, en particular, aquellos relacionados con la agroecología y los sistemas alimentarios sostenibles, los que serán el "objetivo" de nuestras reflexiones, en el presente capítulo abordaremos los aspectos fundamentales de la tecnología digital, su uso en la agricultura y la investigación actual. En la Introducción, revisamos los pilares de la agricultura digital, que pueden resumirse como datos, capacidades de procesamiento, conectividad para permitir datos e intercambio de información y, finalmente, automatización. Los desafíos que enfrenta la agricultura involucran a todos los niveles del ciclo de datos, desde la captura hasta el uso pasando por la recopilación, la trazabilidad, el procesamiento, el almacenamiento, la interpretación, la entrega y la aplicación en sistemas automáticos y robóticos.

3.1 Datos

El uso de la tecnología digital en la agricultura produce grandes volúmenes de datos altamente heterogéneos que se pueden calificar como "*big data*" (Bellon-Maurel et al., 2018). Esto es particularmente complejo porque incluye observaciones de objetos y ambientes complejos de distintas naturalezas y que operan en niveles espacio-temporales muy diferentes (por ejemplo, desde el gen hasta el campo), con fuertes interacciones intranivel e internivel e involucrando a numerosos actores. Esta complejidad conduce a preguntas sobre qué datos recolectar (naturaleza, frecuencia, objetivo, etc.) para guiar el despliegue de una solución técnica a todos los niveles (hardware, software, interfaz, etc.).

Captura de datos (qué, por qué, dónde y cómo)

Los desafíos de la captura de datos están relacionados tanto con el hardware como con el software. Saber para qué están destinados los datos ayuda a determinar la elección del equipo de medición.

Primero, se debe especificar la naturaleza de la medición (temperatura, humedad del aire o del suelo, condición de las hojas de una planta, peso de un animal, etc.) y la precisión requerida. Estos requisitos, que dependen de las necesidades definidas, varían mucho de un uso a otro. El segundo problema es cómo capturar los datos. La naturaleza, el tamaño, el peso, el volumen y la robustez del sensor también dependerán de la naturaleza de la medición, el objeto al que se aplique y el entorno en el que se colocará: los sensores para animales se eligen según el peso, el volumen del equipo y el tamaño del animal. Del mismo modo, un sensor para mediciones en terreno del suelo o las plantas requerirá protección para que

sea resistente al entorno que lo rodea (humedad, variaciones de temperatura, resistencia a golpes, etc.). Finalmente, la forma en que se utilizarán los datos definirá el método de muestreo, en particular, la ubicación de la recolección y la resolución espacial y temporal (Brun-Laguna et al., 2018). Por ejemplo, ¿deben los sensores posicionarse por m² o por km²? Si el objetivo es monitorear animales, ¿deben todos o solo algunos de los animales del rebaño llevar el equipo? (Jabbar et al., 2017)? ¿Qué frecuencia de tiempo se requiere y debe ser constante? Algunas aplicaciones requieren una alta frecuencia espacial y temporal, que ofrece la teledetección por satélite. Otros necesitan mediciones menos frecuentes, como las obtenidas a partir de datos participativos (Minet et al., 2017).

La decisión de qué tecnología y equipos utilizar y qué metodologías implementar para el despliegue de sensores ha sido objeto de numerosos estudios en las últimas décadas, con aplicaciones tanto en cultivos como en ganadería: identificación y geolocalización mediante RFID (Ruiz-García y Lunadei, 2011) o GPS; imágenes (2D, 3D, infrarrojos, hiperespectrales), acelerometría, acústica, mediciones bioquímicas en fluidos (incluidos biomarcadores), robots de medición como básculas, medidores de agua o leche, dispensadores de alimentos, etc. (Chastant-Maillard y Saint-Dizier, 2016; Halachmi et al., 2019). En la mayoría de los casos, se deben hacer concesiones entre costo, resolución, precisión y practicidad (Foubert y Mitton, 2019). La investigación pretende limitar estas concesiones, ya sea desarrollando sensores cada vez más precisos, eficientes en el consumo de energía, más pequeños, menos intrusivos y menos costosos, o diseñando dispositivos de adquisición masiva de datos (mediante imágenes de satélite, drones, etc.). El despliegue de nuevas constelaciones de satélites (Sentinel-2)[28], que producen imágenes de alta resolución (tanto espaciales como temporales) disponibles de forma gratuita, ofrece nuevas oportunidades de seguimiento.

En conclusión, el trabajo para desarrollar sistemas de adquisición es intrínsecamente multidisciplinario y requiere la colaboración entre agrónomos, biólogos, zootecnistas, genetistas, informáticos, ingenieros electrónicos y usuarios finales para garantizar que los requisitos de los usuarios (que a veces ellos mismos son investigadores en otro campo) se cumplan y combinar el conocimiento de los objetos de estudio, sus especificidades y sus limitaciones con el conocimiento de la tecnología digital.

28. https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2

Por ejemplo...

Varias unidades de INRAE están desarrollando ciertos dispositivos de adquisición para el fenotipado o monitoreo de animales o cultivos. Ejemplos incluyen: dispositivo de adquisición de imágenes 3D de alta velocidad y sus métodos de procesamiento asociados para medir la condición física y morfológica de las vacas lecheras, desarrollado por la Unidad Mixta de Investigación (UMR, por sus siglas en francés) **PEGASE** en colaboración con el Instituto Técnico de Agricultura **IDELE** y la compañía **3D Ouest**. La Unidad Experimental (UE) **PEAT** y la UMR **BOA** han desarrollado un alimentador automático para estudiar la ingesta de alimentos y el comportamiento individual de alimentación de las aves criadas en grupos. El detector de montaje electrónico "ALPHA" (compañía Wallace), basado en un lector RFID automático usado por un carnero, fue diseñado por UMR **SELMET** para detectar automáticamente el calor en las ovejas, en particular en la ganadería a gran escala. En el medio vegetal, la UMR **ITAP** y la Unidad Mixta Tecnológica (UMT) **CAPTE** están desarrollando sensores ópticos para fenotipado y detección temprana de enfermedades en plantas. La UMR **TETIS** utiliza sensores remotos satelitales para detectar defectos en las parcelas. La adquisición de datos fenotípicos utilizando sensores está siendo abordada por programas e infraestructuras a gran escala como **PHENOME** sobre la caracterización de cultivos obtenidos en invernadero y en el campo e **IN SYLVA** en bosques. Los datos resultantes se pueden utilizar para mejorar las capacidades predictivas de los modelos y cómo estos tienen en cuenta las interacciones entre los genotipos y el medio ambiente. En términos más generales, también se están desarrollando sistemas de alta velocidad de fenotipado en unidades experimentales de plantas y animales en INRAE.

Recolección y transmisión de datos (qué datos enviar, cuándo y cómo)

Una vez que los datos se han recibido, se deben transmitir. Algunos sistemas utilizan comunicación por cable (Ethernet, serial, etc.), pero esto no siempre es posible y los sensores deben estar equipados para la comunicación inalámbrica, lo que plantea diferentes desafíos. La captura y la transmisión de datos en la agricultura utilizan cada vez más tecnología de la Internet de las cosas (IoT) (Zhao et al., 2010), especialmente RFID y redes inalámbricas de sensores con características específicas para la agricultura.

Monitoreo de animales en reproducción extensiva. © Selmet – CIRAD.

La mayoría de los sensores inalámbricos depende de fuentes de energía que son ya sea limitadas (por ejemplo, baterías) o variables (por ejemplo, generado por medio de un colector solar) y, por lo tanto, se deben preservar. La transmisión de datos suele ser el factor que consume más energía y presenta el mayor desafío, por lo que el objetivo es limitar la cantidad de datos enviados y mantener la precisión de datos necesaria para que la aplicación funcione. Por lo tanto, la investigación se centra en el procesamiento de datos en el sensor, que en sí mismo tiene una capacidad informática y de memoria limitada, utilizando la agregación de datos espaciales o temporales (Salim et al., 2020) y métodos simplificados de inteligencia artificial. Por ejemplo, los investigadores utilizan la correlación entre dos cantidades (como la temperatura y la humedad) para transmitir solo uno de los dos valores e interpretar el segundo. Otra opción es predecir en forma local el siguiente valor a medir y solo transmitir los datos si éste no coincide con el valor predicho. Mientras más exigente es una aplicación en términos de resolución temporal o exactitud, mayor transferencia de datos se requiere. Esto también exige una concesión entre eficiencia, precisión y costo.

Por ejemplo...

En Inria, los equipos de los proyectos **FUN** y **EVA** están trabajando en la recopilación de datos para la agricultura que usa redes de sensores inalámbricos. Su trabajo se refiere tanto a los protocolos específicos de red como también qué datos transmitir para evitar saturar los medios de comunicación y reducir el consumo de energía de las transmisiones. El equipo-proyecto **FUN** está instalando sensores en viñedos en Sudáfrica para mejorar el riego y la gestión del agua. De igual forma, ellos colaboran con Sencrop, que utiliza sensores en el cultivo de cereales y papas. **EVA** instala sensores en los árboles de duraznos en Argentina para protegerlos de las heladas.

La elección de la tecnología de comunicación depende de la cantidad de datos que se quiere recuperar, así como de la distancia a cubrir y de la ubicación de los sensores. Para los datos que se deben recoger a larga distancia y que requieren mayores intervalos entre transmisiones (como lecturas de temperatura una vez al día) se usaría tecnología de largo alcance con una baja tasa de datos y consumo de energía, mientras que las lecturas de alta frecuencia (como el seguimiento de animales en video) requieren una alta velocidad de datos. Los puntos de medición pueden estar ubicados en áreas no cubiertas por tecnología celular (como 3G/4G/5G o LPWAN – Red de Área Amplia de Baja Potencia), que requeriría implementar mecanismos específicos de red tales como el enrutamiento (retransmisión de información a la estación de destino). Esto debe tener en cuenta las restricciones y los requisitos de las aplicaciones y las limitaciones materiales y características de la radiotecnología existente (*Foubert y Mitton, 2021*) y el entorno en donde los sensores se despliegan (*Ferreira et al., 2020*). Una dificultad adicional es la heterogeneidad de las tecnologías que deben coexistir y, en ocasiones, cooperar, así como los desafíos más generales de la Internet de las cosas (IoT), abordado por Inria en el libro blanco sobre la Internet de las Cosas[29].

29. Los desafíos científicos de la Internet de las Cosas. Libro Blanco de Inria. https://www.inria.fr/en/inria-white-paper-internet-things-iot

Por último, están surgiendo soluciones móviles de captura de datos para los "puntos negros" (zonas sin conectividad), que van desde soluciones simplificadas (dispositivos portátiles de datos que se pueden llevar en una mochila, como en el caso del proyecto COWSHED en África[30] hasta soluciones de alta tecnología con dispositivos "aéreos" (drones o nanosatélites). Lo último puede recoger datos de miles de objetos conectados a una velocidad baja de datos (protocolo LoRa) o a una velocidad alta de datos (es decir, 100 kB por transmisión) utilizando un número menor de terminales en tierra (alrededor de 100) (protocolo UHF). Se están desarrollando aplicaciones en el campo de la agricultura, como en Australia, donde los agricultores monitorean de forma remota el nivel de los tanques de riego utilizando nanosatélites.[31]

Definición

La Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés) es la interconexión de Internet con las cosas, lugares y entornos físicos. El término se refiere a un número cada vez mayor de objetos que están conectados a Internet, lo que permite la comunicación entre los aspectos físicos y digitales de nuestras posesiones. La IoT combina una amplia gama de tecnologías, desde simples etiquetas RFID hasta aplicaciones para teléfonos móviles y redes de sensores inalámbricos. Las tecnologías de radiocomunicaciones son diversas con diferentes características en cuanto a velocidad de datos, consumo, alcance, etc. Los sensores pueden estar equipados con microcontroladores con diferentes niveles de potencia y consumo de energía.

Almacenamiento e intercambio de datos, trazabilidad

Una vez que los datos se han sido capturado y transmitido, se pueden utilizar para una variedad de fines. En primer lugar, se pueden almacenar y procesar para extraer conocimiento, anticipar funcionamientos defectuosos, etc. Estos datos pueden ser muy heterogéneos y de niveles de calidad variable. También pueden tener tasas de muestreo muy diferentes debido a que provienen de diferentes fuentes (sensores físicos, sensores "humanos" o incluso resultados de simulación) y pueden tener un volumen muy grande (muchos puntos de captura, frecuencia temporal potencialmente alta). Los métodos derivados de la gestión de datos multivariados y ahora del big data ofrecen una respuesta a los desafíos que presentan el volumen, la velocidad de procesamiento y la diversidad de formatos

30. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03102190/document
31. https://which-50.com/world-first-australian-iot-uses-satellites-to-monitor-farmers-tanks-rain-levels/

y fuentes (Bellon-Maurel et al., 2018). El requisito previo para el uso exitoso de estos datos es que cumplan con los principios rectores de "FAIR", que significa que los datos sean Encontrables, Accesibles, Interoperables y Reutilizables[32], con una intervención humana mínima. Por lo tanto, existe una demanda de una nueva generación de sistemas información adaptados a la agricultura a fin de gestionar y estructurar esta compleja masa de datos utilizando los principios FAIR. Los metadatos y los datos deben estar bien descritos utilizando recursos semánticos (ontología, taxonomía, tesauro) para hacerlos comprensibles y facilitar el acceso a través de protocolos estandarizados.

Por ejemplo...

En INRAE, los centros de proceso de datos automatizado (**CATI**) unifican y estructuran capacidades, metodologías y tecnologías para facilitar la reutilización de datos, como **CATI SICPA** (Sistemas Informáticos y Computarización para Fenotipado en Animales), el Códice **CATI** (Fenotipado para Plantas) y **CATI GEDEOP** (Gestión de Datos de Experimentación, Observación y Práctica en sistemas agrosocioecológicos).

Por último, el tema de la validación de datos se está convirtiendo en una cuestión central gracias al aumento de las cantidades de datos recogidos: ¿es correcto el valor medido, para qué aplicaciones y en qué condiciones?

Existe una variedad de sistemas de administración de bases de datos (DBMS, por sus siglas en inglés) según el modelo de datos utilizado, siendo el modelo relacional el más común actualmente. Benchini et al. (2007), por ejemplo, combinó un modelo de simulación de un sistema de cultivo dinámico con una base de datos relacional para lograr un almacenamiento eficiente y análisis de los datos del modelo a nivel de la granja. Sin embargo, cuando se trata de manejar volúmenes muy grandes (del orden de los petabytes) o datos complejos y heterogéneos (gráficos, documentos, etc.) en contextos altamente distribuidos (servidores remotos, Internet de las cosas, etc.), son más pertinentes las bases de datos tipo NoSQL que usan un modelo de datos diferente, y que tiene menos restricciones conceptuales que el modelo relacional.

32. Wilkinson et al. The FAIR Guiding Principles for scientific data management and stewardship. Scientific Data 3, 160018. doi:10.1038/sdata.2016.18.

En algunos casos, el objetivo principal es compartir los datos entre múltiples actores, por ejemplo, para limitar el fraude o validar ciertos procesos (después del seguimiento correcto de una ruta determinada, cumplimiento de la cadena de frío, producción local o requisitos libres de insecticidas). A fin de lograr esto, una de las herramientas digitales más prometedoras actualmente disponibles es la *blockchain* (*Bermeo-Almeida et al., 2018*). Las *blockchains*, que utilizan una base de datos distribuida que no requiere una entidad de control, fechan los componentes que contienen y garantizan su inalterabilidad. En la agricultura, esta tecnología permite registrar las etapas de vida de un producto y así asegurar la trazabilidad (*Kamilaris et al., 2019*). Ofrece múltiples ventajas (véase el Capítulo 4: Oportunidades), incluida la transparencia y los registros de transacciones entre agricultores, proveedores, compradores, consumidores etc. En algunos sectores, el uso de *blockchains* permite evitar procesos de certificación largos y costosos (*Lin et al., 2017*).

Sin embargo, las *blockchains* también plantean nuevos desafíos digitales y organizacionales. En cualquier sistema informático, siempre existe un riesgo inherente de hackeo. De igual forma, la tecnología del blockchain inicialmente fue diseñada para transferir e intercambiar bienes intangibles (fondos, certificados, diplomas) y no es infalible en los casos en que los flujos de información deban ir acompañados de flujos físicos, por ejemplo, en la agricultura y la agroalimentación, donde los datos digitales deben ser una representación exacta del flujo físico. Además, la seguridad percibida de una blockchain se basa en un mecanismo conocido como "evidencia del trabajo" (de operaciones informáticas), que valida los nuevos bloques (blocks) a incorporar. Las *blockchains* públicas se basan en un gran número de "evidencias del trabajo", lo que consume mucha energía, y la investigación actualmente se centra en reducir la complejidad de estos algoritmos criptográficos para reducir su consumo de energía.

3.2 Modelado, simulación y optimización

Si los datos son una de las fuerzas impulsoras de la agricultura digital, el modelado también es esencial para vincular las mediciones y las observaciones con las interpretaciones y las recomendaciones a fin de ayudar a los actores del sector agrícola a comprender mejor, gestionar y mejorar sus sistemas de producción.

En el campo de la agricultura y la investigación agronómica, el enfoque científico de modelado para predecir cosechas surgió ya en el reinado del faraón egipcio Sesostris I, cuando se usaban los niveles de los ríos para hacer pronósticos de los cultivos (*Gros de Beler, 1998*), o entre agricultores incas que sabían con varios meses de anticipación qué ciclos agrícolas esperar al observar la naturaleza (*Gutiérrez,*

2008). Mucho después, el trabajo pionero de Mendel (*Mendel, 1907*) y luego de Fisher (*Street, 1990*) legitimó definitivamente el uso de modelos estadísticos en los campos de la genética y la agronomía. En la segunda mitad del siglo XX, el modelado agrícola se desarrolló especialmente en las economías rurales para racionalizar y optimizar la producción, la agronomía y la zootecnia, el manejo de cultivos, la nutrición animal y la selección genética en plantas o animales. Con el desarrollo de los computadores y las primeras calculadoras, el modelado fue gradualmente más allá de la estadística y la investigación operativa y utilizó cada vez más formalismos algorítmicos y simbólicos para producir modelos expresados en términos matemáticos e informáticos y en los que la simulación juega un papel clave.

La función general de un modelo a menudo se denomina función de mediación: "*para un observador B, un objeto A* es un modelo de un objeto A en la medida en que B puede usar A* para responder las interrogantes que le interesan respecto de A*" (*Minsky, 1965*). Esta mediación puede ayudar a cumplir diferentes objetivos cognitivos: facilitar la experiencia, la formulación inteligible, la teorización, la comunicación y la co-construcción del conocimiento, la decisión y la acción (*Varenne y Silberstein, 2013*). Hoy en día, el modelado agrícola se refiere a un espectro muy amplio de objetos y tiene cuatro propósitos principales: análisis, comunicación, predicción y control de la evolución de varios componentes en un sistema agrícola y diseño y optimización del sistema en cuestión. En el resto de esta sección, presentaremos algunos de los principales tipos de modelos y cómo se pueden utilizar en la agricultura digital gracias a la simulación y la optimización.

Qué modelar, para qué propósito y con qué herramientas

¿Qué modelar? – n la agricultura, los objetos de estudio –o sujetos del modelo– son sistemas naturales antropizados que pueden involucrar múltiples escalas y niveles de organización. El modelado se centra en los componentes de estos sistemas, así como también en los procesos que regulan su dinámica, los eventos que activan o inhiben estos procesos y los factores exógenos que los influencian (tales como las condiciones climáticas) (*Martin et al., 2011*). Algunos de los componentes son biológicos (como cultivos con procesos de crecimiento, enfermedades) (*Kumar y Sinhg, 2003*) mientras que otros se centran en los papeles que juegan los actores humanos. En el último caso, el modelado puede involucrar ya sea a un individuo único (Martin-Clouaire and Rellier, 2004; 2009) o a un grupo de individuos (como los miembros de una cooperativa) y los procesos sociales de la coordinación de la actividad llevada a cabo por diferentes individuos en el colectivo (*Drewniak et al., 2013; Manson et al., 2016*).

Por ejemplo...

Muchos equipos y unidades están desarrollando modelos de procesos, flujos e interacciones. A continuación, se presentan algunos ejemplos a diferentes escalas.

En INRAE, varios equipos están trabajando en el modelado de cultivos o ganado, ya sea parcela por parcela (modelos de cultivos multiespecie tales como **STICS**, , que describen el crecimiento de acuerdo a las variables de clima y medioambiente), a nivel individual (modelos de crecimiento animal de acuerdo a su dieta y medioambiente), o a grandes escalas (modelos de epidemiología en plantas que incluyen dispersión entre parcelas y modelos de epidemiología animal que describen transmisiones entre manadas, etc.). Estos modelos están alojados en plataformas de modelado tales como **RECORD**, **OPEN ALEA** y **OPEN FLUID** y forman la base para la ejecución de simulaciones de acuerdo a los diferentes escenarios de clima y contextuales.

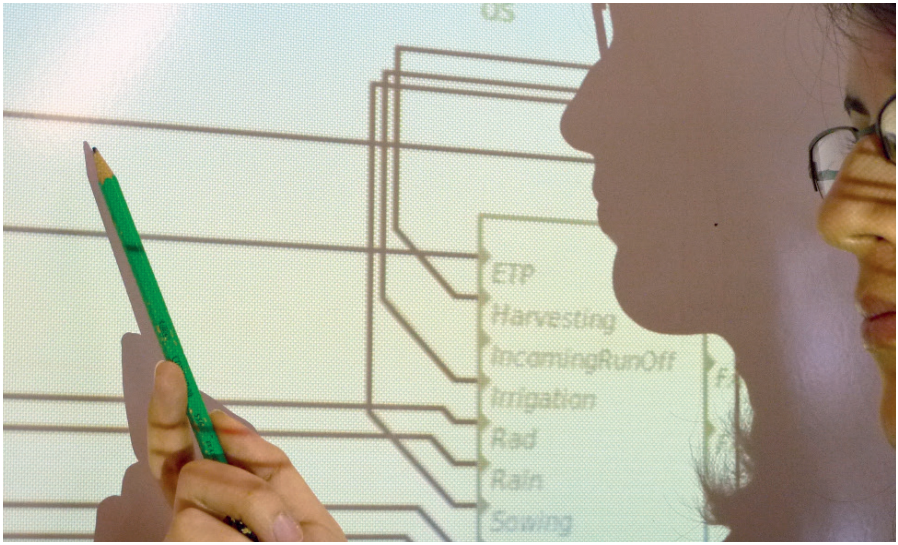
El equipo-proyecto **STEEP** (Inria, CNRS, Université Grenoble Alpes) desarrolla modelos matemáticos para el análisis de flujos de materiales (producción, transformación, intercambios, consumo, residuos) en la agricultura y el sector forestal-maderero con el fin de 1) comprender las vulnerabilidades aguas arriba/aguas abajo en los sectores, 2) cuestionar el uso de los recursos naturales y los posibles problemas causados por la competencia por el uso y, finalmente, 3) evaluar los impactos ambientales. Las herramientas desarrolladas se basan en el modelado de cadenas en términos de productos y sectores y los flujos existentes entre ellos. Una de las principales dificultades es la naturaleza particularmente irregular e inconsistente de los datos.

El equipo-proyecto **EASE** (Inria, Ecole Nationale Supérieure Mines-Télécom Atlantique Bretagne Pays de la Loire, Université de Rennes 1) está desarrollando una serie completa de nuevos modelos de interacción, que ofrecen herramientas para aumentar y describir la información a partir de sistemas complejos. El trabajo se ha aplicado al manejo energético en la agricultura. En particular, el modelo ayuda a definir cómo reducir el impacto ambiental del consumo de energía al optimizar un sitio existente o instalar nuevas centros. Ha demostrado que la optimización de un solo parámetro por sí solo (producción local, almacenamiento o transferencia de procesos) no es suficiente para maximizar el autoconsumo y minimizar los requerimientos energéticos.

¿Con qué fines se debe modelar? – El nivel de detalle de los sistemas de modelado en el núcleo mismo de un estudio se define según el propósito de la investigación y la herramienta en consideración. Los objetivos que se aplican con mayor frecuencia van desde identificar los propósitos y los medios de gestión de los agroecosistemas hasta la predicción del rendimiento (Rio et al., 2019) dentro del contexto de diferentes situaciones, pasando por la identificación de riesgos y el análisis crítico del funcionamiento y conducta de los sistemas de producción agrícola (Li et al., 2019). El modelado también puede permitir el diseño de nuevos sistemas tales como la configuración y el dimensionamiento de una cadena logística (Taghikhah et al., 2021).

Por ejemplo...

Muchos modelos corresponden al manejo del agroecosistema. El equipo-proyecto conjunto **INRIA** / **INRAE** **BIOCORE** (CNRS, Sorbonne Université-UPMC) se centra en el modelado y control en epidemiología para agricultura tropical. En INRAE, la UR **MIAT** y la UMR **MISTEA** desarrollan modelos de simulación y métodos de optimización para manejo de agroecosistemas a nivel de granjas. Para animales, las UMR tales como **BIOEPAR**, **SELMET**, **MoSAR**, **UMRH** y **PEGASE** están desarrollando modelos sobre salud y epidemiología en animales, ingesta dinámica, fenómenos digestivos y metabólicos y sistemas de ganadería. Por ejemplo, la UMR **PEGASE** ha desarrollado nuevos modelos para ajustar la alimentación diaria según las necesidades nutricionales de cada animal para la alimentación individualizada de cerdas gestantes y lactantes (Gauthier et al., 2019)



Construir un modelo agronómico. © INRAE.

¿Cómo modelar? – El modelado por computadora para apoyar el análisis, diseño y manejo de los sistemas agroecológicos se combina con los enfoques que utilizan ya sea la simulación o la optimización (*Li et al., 2020*). En la simulación dinámica, el modelado del fenómeno considerado importante para los objetivos del estudio se centra en el realismo (*Kaghazchi et al., 2021*), mientras que la optimización involucra exploración algorítmica del espacio de alternativas que eficientemente buscan una solución óptima de acuerdo a uno o más criterios formulados explícitamente y que utilizan modelos matemáticos reduccionistas (*Ezanno et al., 2020; Casagli et al., 2020*). Los dos modelos tienen objetivos relativamente antagonistas (modelado de realismo versus eficiencia computacional) y, por lo tanto, en general usan diferentes enfoques de modelado.

Marcos de representación

Los sistemas agroecológicos son objetos complejos donde los modelos, por un lado, se preocupan del funcionamiento de las entidades biofísicas que los componen (suelo, plantas, animales, minerales y flujos de agua, etc.) y, por otro, de la toma de decisiones humanas y la acción sobre estas entidades biofísicas (*Zabala et al., 2021*). Los modelos transmiten conocimiento que proviene principalmente de las disciplinas científicas tales como agronomía, zootécnica, ciencia del medio ambiente, ciencias administrativas y humanidades.

Los modelos biofísicos se pueden clasificar en tres áreas principales: mecanicistas, empíricos e híbridos (*Reyniers, 1996*). Los modelos mecanicistas se enfocan en eventos, relaciones causales y procesos, mientras que los modelos empíricos tratan sistemas como "cajas negras" y únicamente describen en general el fenómeno biofísico subyacente. Estos modelos representan la dinámica entrada-salida de un componente del sistema en términos de datos de observación. En realidad, existen pocos modelos verdaderamente mecanicistas o empíricos. En general, los modelos son híbridos o se clasifican en una o la otra categoría según si poseen componentes principalmente mecanicistas o empíricos. La comprensión total y el nivel de información requerida para construir estos modelos es mayor en la medida en que nos movemos desde los modelos empíricos hacia los mecanicistas. Al hacer explícita la causalidad, los modelos mecanicistas pueden ser más complejos, mientras que los modelos empíricos son generalmente más simples, pero tienen un alcance de aplicación más limitado debido a problemas de disponibilidad de datos estadísticos.

El modelado de decisiones varía según la hipótesis del modelador respecto al tomador de decisiones. En un primer tipo de hipótesis, se asume que el tomador de decisiones es perfectamente racional (en el sentido de la economía) y, cuando se toma una decisión, determina la elección matemáticamente óptima de acuerdo a las funciones de utilidad definidas teóricamente. En un segundo tipo de hipótesis, conocida como hipótesis de racionalidad limitada, el agente toma una decisión que lleva a un resultado que considera satisfactorio dada la información disponible y su nivel de aspiración. A menudo se usan modelos mentales de variados niveles de sofisticación, que incluyen modelos basados en reglas de decisión que se asocian a situaciones con decisiones o acciones (*Martin- Clouaire, 2017*). Para facilitar y estandarizar el desarrollo de estos modelos, se pueden utilizar ontologías para definir los conceptos, relaciones y otras distinciones relevantes para las áreas en cuestión (principales cultivos, producción ganadera, etc.) (*Roussey et al., 2011*). Una ontología (see Section 3.4) es un modelo abstracto (metamodelo) del área y proporciona las primitivas de representación que permiten la instanciación de modelos para sistemas específicos en forma de bases de conocimiento (*Martin-Clouaire y Rellier, 2004; Fishwick, 2007*).

Definición

Una ontología define un vocabulario y los vínculos semánticos entre los elementos del vocabulario. El vocabulario se compone de nombres de conceptos (o "clases"), que son tipos de entidades conocidas por el sistema y nombres de posibles relaciones (o "papeles") entre estas entidades (por ejemplo, la relación de "plaga" vincula dos entidades tipo "organismo vivo"). La ontología se describe en un lenguaje computacional lógico que expresa la representación del conocimiento en diferentes grados de expresión. Abarca desde una taxonomía simple (un conjunto de conceptos estructurados por especialización progresiva) a descripciones complejas de elementos de vocabulario y sus vinculaciones semánticas. El lenguaje utilizado permite la implementación de razonamiento automático.

Evento discreto, tiempo discreto y sistemas de tiempo continuo – Un modelo de simulación de evento discreto permite la representación de un sistema dinámico que usa variables cuya evolución depende completamente de que ocurran eventos asincrónicos en el tiempo. Un caso particular es cuando la progresión en el tiempo es en incrementos fijos. El enfoque de eventos discretos contrasta (pero no se opone) con el enfoque de "dinámica del sistema" en el que el estado del sistema se modifica continuamente a lo largo del tiempo en función de un conjunto de ecuaciones diferenciales que definen las tasas de variación y las variables de estado. En cada uno de estos diferentes casos, los investigadores buscan representar relaciones causales (es decir, para el aspecto biofísico, modelos mecanicistas). Uno de los formalismos mejor conocidos es la especificación de sistemas de evento discreto – DEVS (Zeigler et al., 2000), que se basa en un marco genérico que permite diferentes adaptaciones a formalismos específicos como redes de Petri, autómatas celulares y, a nivel más general, modelos con intervalos de tiempo fijo. Las redes de Petri son un formalismo matemático bastante popular debido a su capacidad para representar la sincronización de procesos que se ejecutan en paralelo y ofrecen posibilidades para el análisis riguroso de modelos. Un autómata celular se construye utilizando una red de células discretas y es muy adecuado para representar dinámicas espaciales (como la propagación de una infestación) y fenómenos de auto-organización (como la dinámica del paisaje de la reforestación natural). Algunos formalismos como diagramas de transición de estados (Léger y Naud, 2009), autómatas temporizados (Hélias et al., 2008) y redes de Petri (Guan et al., 2008) también se pueden adaptar a procesos para verificar el comportamiento del modelo (por ejemplo, para asegurarse que no pueda bloquearse) o sus propiedades temporales.

Automatic detection of mangoes by artificial intelligence from a smartphone photo. Hortsys.
© Hortsys – CIRAD.

Modelos basados en individuos o agentes – Estos modelos se enfocan en sistemas que pueden desglosarse en una serie de entidades (como plantas, animales, zonas) que actúan o interactúan (Daudé, 2004; DeAngelis y Díaz, 2019). Cuando se combina con un enfoque basado en autómatas celulares, el enfoque basado en individuos permite la representación espacial y la simulación de procesos biofísicos en un territorio dividido en parcelas. Cuando las entidades modeladas adquieren capacidades cognitivas y de toma de decisiones más elaboradas (Bahri et al., 2020), hablamos de modelos agentes que permiten, por ejemplo, la simulación del comportamiento de la toma de decisiones de un grupo de agentes (como los agricultores) y que operan en un determinado territorio (Huber et al., 2018). A menudo se ha modelado el manejo de las granjas utilizando mecanismos simples para desencadenar reglas de toma de decisiones asociadas con situaciones posibles. Sin embargo, con este enfoque ha resultado difícil controlar el orden en que se utilizan las reglas y mantener la base de reglas una vez que alcanza un tamaño determinado. El enfoque BDI (Creencia, Deseo, Intención) introdujo una mejora (Georgeff et al., 1970; Bratman, 1987), lo que permite modelar el proceso por el cual un agente toma decisiones en base a una percepción de la situación actual (creencia), los objetivos declarados (deseo) y las decisiones sobre cómo proceder hacia los objetivos (intención).

Por ejemplo...

La UR **INRAE-MIAT** ha desarrollado varios formalismos para representar y simular el comportamiento de la toma de decisiones de los agricultores cuando gestionan sus granjas usando el enfoque BDI, la planificación temporal y la incertidumbre en la inteligencia artificial. Por ejemplo, Martin-Clouaire y Rellier abordan el problema del manejo de la producción como un tema de coordinación de un conjunto de actividades organizadas en planos flexibles para el cual es posible simular la implementación en un contexto determinado (Martin-Clouaire y Rellier, 2009). Para los ejemplos de aplicación en la producción láctea véase Martin et al. (2011) y Martin-Clouaire et al. (2016) en viticultura

Modelos basados en restricciones – Los modelos basados en restricciones usan una gama variada de formalismos que están fundados principalmente en el concepto de los grafos que modelan las relaciones binarias entre las variables (Hurley et al., 2016). Estas relaciones pueden modelar correlaciones e influencias causales, ya sea deterministas o probabilísticas, como en el caso de las redes bayesianas y las cadenas de Markov. Estas redes también pueden describir restricciones entre variables en términos de combinaciones de valores aceptables o inaceptables, lo que lleva a un problema de satisfacción de restricciones (Constraint Satisfaction Problem o CSP, por sus siglas en inglés) (Moummadi et al., 2011). De manera similar, los métodos de programación lineal se basan en la optimización de una combinación lineal de múltiples variables conectadas por relaciones lineales llamadas restricciones. (Maqrot et al., 2017).

Por ejemplo...

En INRAE, la UMR **BAGAP** trabaja en el modelado del problema de la distribución dinámica del cultivo en una granja, mediante restricciones espacio-temporales y la herramienta de solución toolbar2 (Akplogan et al., 2013). Por ejemplo, el equipo analizó el paisaje boscoso de la región de Charolais-Brionnais para mostrar la singularidad de este paisaje y su idoneidad para las diferentes estructuras y funciones de los setos. Gracias a este análisis, el campo se agregó a la lista de posibles sitios a presentar a la UNESCO para la protección del patrimonio.

Modelado y simulación

La principal ventaja de los enfoques de modelado es, sin duda, la capacidad de modelar y simular comportamientos complejos en los sistemas agrícolas y, en términos más generales, en los sistemas socioecológicos como los agroecosistemas (Peart and Curry, 1998). Los modelos, especialmente los basados en agentes, suelen ser complejos debido al número y a la heterogeneidad de los componentes y las interacciones y su sensibilidad a las variaciones que afectan a los sistemas. Su comportamiento es difícil de estudiar debido a que los fenómenos comprendidos son no lineales, con múltiples discontinuidades y retroalimentación entre niveles de organización y escalas. Algunos de estos modelos representan agentes cognitivos con comportamiento de racionalidad limitada. Se han desarrollado numerosas aplicaciones agrícolas basadas en plataformas CORMAS (Bommel et al., 2015) y GAMA (Taillandier et al., 2010), por ejemplo para el estudio del manejo del agua, la reforma de la Política Agrícola Común, la reducción del uso de pesticidas y el desarrollo de la agricultura orgánica.

Por ejemplo...

En INRAE, la UMR **AGROECOLOGIE** coordina el desarrollo de la plataforma MAELIA para el modelado y evaluación integrada de sistemas socio-agroecológicos. Su objetivo es producir conocimientos de la estructura, el funcionamiento y el desempeño de estas formas de agricultura a nivel de parcela, campo o territorio.

En la práctica, los enfoques de modelado y simulación ofrecen una variedad de usos, que van desde análisis de laboratorio realizado por científicos, apoyo en la toma de decisiones (Huber et al., 2018), decisiones tomadas en tiempo real por agricultores o asesores agrícolas y apoyo para negociaciones entre partes interesadas (por ej. modelos de apoyo para el manejo conjunto del agua en un territorio) al codiseño de nuevos sistemas de producción por un grupo de agricultores y capacitación. Los agricultores individuales o en grupo pueden, de esta forma, mejorar su entendimiento del funcionamiento biofísico y obtener ideas para mejorar el sistema estudiado en términos de la calidad del producto, vulnerabilidad del sistema, consecuencias ambientales de las prácticas implementadas, reducción de la sobrecarga de trabajo y el trabajo pesado y, finalmente, del desempeño económico vinculado a la aplicación de principios agroecológicos.

Por ejemplo...

En INRAE, las habilidades se agrupan en **CATIs** para el modelado de sistemas a gran escala, tales como **IMOTEP CATI** (Información, Modelos y Procesamiento de Datos en Epidemiología y Dinámica de Poblaciones) y **IUMAN CATI** (Computarización y Uso de Modelos para Agroecosistemas). El trabajo abarca tanto el modelado de la propagación de epidemias en plantas o animales como el desarrollo de software para plataformas y pruebas de concepto que permitan compartir y computarizar estos nuevos modelos a múltiples escalas.

Modelado y optimización

Por definición, la optimización analiza posibles soluciones a un problema dado mediante diferentes métodos para encontrar un óptimo u óptimos de acuerdo con un criterio o conjunto de criterios (Zelinka et al., 2013). Se usa en diferentes áreas de la agricultura y a diferentes escalas (Plà-Aragonés, 2015). A nivel de granja, la optimización se implementa de forma explícita o implícita, ya sea en la formulación de alimentos, la gestión del rebaño, la planificación del sacrificio de animales, la planificación del cultivo y el uso de la tierra o el manejo del agua. También se utiliza a diferentes escalas, incluidos grupos de explotaciones agrícolas, territorios, regiones y países, para gestionar el uso de la tierra, el agua y el comercio económico y cuestiones de mercado. (Carpentier et al., 2015). En estos casos, los modelos bioeconómicos se emplean de acuerdo con un enfoque analítico, en el que el objetivo principal es evaluar el impacto de la aplicación de restricciones y criterios a las soluciones óptimas.

Debido a la complejidad de los sistemas agrícolas y los cambios en las cuestiones relacionadas con la agricultura, la optimización también ha evolucionado en la agricultura (Jones et al., 2016). Los primeros modelos económicos de la década del 50 se centraron sobre todo en la maximización del ingreso.

Hoy en día, la formulación de alimentos de bajo costo todavía tiene como objetivo principal obtener el alimento más barato posible y cumplir con los criterios nutricionales. La optimización se ha convertido gradualmente en multiobjetivo para combinar diferentes objetivos: productivos (por ejemplo, producción animal o vegetal, tiempo de trabajo), económicos (por ejemplo, ingresos, costos) o ambientales (niveles de nutrientes, impacto ambiental calculado por análisis de ciclo de vida, servicios ecosistémicos, etc. En las optimizaciones “restringidas”,

las restricciones también son variadas y pueden ser biológicas, estructurales, regulatorias, ambientales o vinculadas a la toma de decisiones.

La optimización de modelos en la agricultura también se ha beneficiado de los avances en los métodos de optimización, utilizando una amplia gama de métodos. Los métodos de programación lineal determinista siguen siendo muy comunes, con adaptaciones para resolver problemas multiobjetivo. Los métodos metaheurísticos estocásticos se aplican solos o en combinación con los anteriores. Estos métodos metaheurísticos permiten abordar la optimización multicriterio y obtener un conjunto de soluciones óptimas consideradas admisibles en el contexto (llamado frente de Pareto); incluyen, por ejemplo, algoritmos evolutivos (como algoritmos genéticos o evolución diferencial) que trabajan sobre una población de soluciones, optimización por enjambres de partículas, búsqueda tabú, recocido simulado, etc. (Kaim et al., 2018; Memmah et al., 2015).

Los problemas actuales relacionados con la optimización se refieren, en particular, a cómo adaptar los métodos a modelos cada vez más complejos y, especialmente en cómo considerar la incertidumbre (Crespo et al., 2010) y el aspecto temporal al momento de formular el problema relacionado con la optimización (Akplogan et al., 2013). Estos problemas hacen eco de aquellos que enfrentan las comunidades de control automático y control óptimo. Otro tema importante de investigación es el acoplamiento entre optimización y simulación (Borodin, 2014), especialmente relacionado con los métodos de aprendizaje por refuerzo (Gosavi, 2015). A pesar de los avances tecnológicos en la potencia de cálculo, el tiempo de procesamiento de los procesos de optimización sigue siendo un factor importante a considerar debido a la creciente complejidad de los modelos en cuestión. Los desarrollos recientes en el metamodelado ofrecen una posible estrategia de simplificación para reducir estos tiempos de procesamiento.

Por ejemplo...

En INRAE, las UMR **PEGASE** y **SMART-LERECO** desarrollan enfoques de optimización multicriterio (rendimiento zootécnico y económico, impacto medioambiental) para estrategias de alimentación en ganadería porcina, en base a modelo de una granja de cerdos.

En Inria hay más de veinte equipos-proyecto trabajando en el desarrollo de algoritmos de optimización, investigación operativa o control.

3.3 Aprendizaje multiescala y extracción de conocimiento

Los dos subcapítulos anteriores presentaron los enfoques utilizados para recolectar datos, seguido de técnicas de modelado basados principalmente en análisis humano. En este subcapítulo, nos enfocaremos en las principales familias de enfoques para construir modelos directamente a partir de datos y, por lo tanto, extraer automáticamente el conocimiento. El conocimiento resultante puede presentarse ya sea a expertos humanos o permanecer dentro de un contexto de aprendizaje para tareas de predicción o identificación, por ejemplo.

Primero mostraremos que los datos "en bruto" enviados por los sensores normalmente no se pueden utilizar en la forma que vienen originalmente, y que preprocesarlos ya es un desafío en sí mismo. Comencemos presentando los tipos de datos utilizados frecuentemente en la agricultura digital y que podrían constituir big data.

Datos masivos en la agricultura

En la agricultura, los datos "masivos" provienen de sensores con alta resolución temporal o espacial, como series temporales y sensores remotos o datos de mapeo de sensores integrados.

Series cronológicas – Una serie cronológica es una secuencia de valores numéricos que representa la evolución de una variable medida en un individuo en el tiempo. Tales secuencias de variables pueden ser modeladas individualmente para entender su evolución pasada y predecir el comportamiento futuro usando modelos del tipo AEMA (Box et al., 2015). En la actualidad, los experimentos en agronomía permiten observar la misma variable en miles de individuos (por ej., el área de las hojas de miles de plantas dentro de un invernadero, la temperatura del ganado) en periodos de tiempo extendidos. El objetivo de analizar estas series cronológicas, por lo tanto, ha evolucionado hacia la búsqueda de características comunes entre series, mayores diferencias o la adquisición de conocimiento más detallado acerca de mecanismos internos (por ej. efecto de genotipos) o externos (por ej. vinculados a las variables medioambientales) que tienen influencia en las variables observadas. Por lo tanto, las series cronológicas se estudian normalmente como funciones de tiempo. Sus datos también se conocen como datos "funcionales" o "longitudinales".

Datos de sensores remotos – Los datos de sensores remotos pueden ser imágenes de un área determinada, tomadas por satélite o por drones. Las imágenes

satelitales –en las que nos enfocaremos más adelante– se pueden registrar en períodos diferentes, y estas secuencias constituyen series temporales. También se pueden tomar desde diferentes satélites en el mismo período, cada uno con un contenido radiométrico diferente (es decir, información de radar, información óptica).

Gracias a recientes misiones espaciales como Copernicus, la dinámica de la planta ahora se puede monitorear con una resolución espacial compatible con el tamaño de los objetos de interés y breves intervalos de tiempo de revisita. La misión satelital Sentinel-1 adquiere información de radar (dos bandas) cada cinco o seis días en la misma área en una resolución espacial de diez metros. Esta fuente de datos proporciona acceso a información sobre la estructura de los objetos (es decir, biomasa forestal o agrícola) y permite monitorear y evaluar las áreas de humedales y el área de tierra que ha sido regada durante un período determinado. Otra misión satelital igual de interesante es Sentinel-2, que entrega información de imágenes multiespectrales (trece bandas), nuevamente entregadas cada cinco o seis días y en una resolución espacial de diez metros. Este sensor óptico es particularmente adecuado para mapear la cubierta de suelo y el uso de suelo, monitoreando la biodiversidad de los estados naturales y para estimulación de producción a gran escala en grandes áreas (Lambert et al., 2018).

En el otro extremo de la escala, a nivel microscópico los datos metaómicos de metabarcoding[33] permiten una mejor caracterización del medio biológico de los cultivos o animales. Estos metadatos se construyen ensamblando las "huellas dactilares" de los genomas presentes o de sus expresiones (ARN, proteínas), lo que permite analizar nuevas dimensiones de los ecosistemas, que pueden explicar mejor el comportamiento de cultivos o animales. Aún estamos al comienzo de la exploración de estas nuevas fuentes de datos, algunas de las cuales siguen siendo difíciles de acceder (proteómicos, metabolómicos, etc.).

33. Metabarcoding es un método de identificación de especies a partir de segmentos de ADN o ARN. En lugar de actuar sobre diferentes especies, metabarcoding determina la composición de especies en una muestra; por lo tanto, permite la identificación de muchos taxones en un conjunto de poblaciones (de bacteria u otros microorganismos) dentro de una muestra medioambiental (p. ej. muestra de suelo, sedimento, excrementos, etc.). Por lo tanto, es uno de los métodos más rápidos para la evaluación medioambiental de la biodiversidad de sistemas ecológicos con un alto número de especies desconocidas o difíciles de identificar.

Preprocesamiento de datos

Los principales desafíos en el preprocesamiento de datos son: i) identificar valores atípicos o datos poco confiables –los datos recopilados durante los experimentos o en el campo son voluminosos, muy ruidosos y se pueden ver afectados por errores causados por distintas cosas, por ejemplo, un sensor defectuoso–, por lo tanto, se necesitan herramientas específicas para anotar estos datos, detectar rápidamente los sensores defectuosos y diagnosticar heterogeneidad en el campo o invernadero para mejorar la calidad de los grupos de datos para análisis futuros; y ii) vincular datos con conocimiento experto, como imitar el razonamiento de un experto por un autómata al validar un conjunto "pequeño" de datos o usar el conocimiento del experto para ajustar curvas (alineación de fechas de etapas fenológicas)

Un desafío particular es la fusión de datos. La información que es difícil de obtener directamente puede ser recuperada combinando datos, ya sea del mismo tipo (por ejemplo, el área de la hoja de una planta puede predecirse a partir del análisis de quince imágenes de esta planta tomadas a partir de diferentes ángulos), o de diferentes tipos. Para hacer esto, vale decir, monitorear el mismo fenómeno o la misma área de estudio, se recolecta un volumen incluso mayor de datos heterogéneos de diversos tipos (datos llamados "multifuente"). El conocimiento contenido en estos datos es una oportunidad real de mejorar nuestro entendimiento de los fenómenos complejos asociados a las prácticas agrícolas modernas a fin de mejorar el monitoreo y la gestión de las mismas. Dentro de este marco general, uno de los principales desafíos hoy es saber cómo usar de mejor manera estas fuentes heterogéneas y complementarias de información, con el fin de obtener la máxima cantidad de información (porque, en la ciencia de la complejidad, "el todo es mayor a la suma de sus partes"[34]). Dependiendo de la tipología de las fuentes involucradas en el proceso, se pueden usar dos estrategias de fusión: fusión temprana y tardía. En el primer caso, los datos se fusionan al inicio del proceso para formar un conjunto de datos nuevo y homogéneo. Esto se puede hacer, por ejemplo, trayendo toda la información disponible a la misma resolución espacial o temporal o unidad de análisis. En este contexto, una vez que el nuevo conjunto de datos se ha construido, se pueden usar las técnicas de análisis estándar de una única fuente. En el segundo caso (fusión tardía), se establece un proceso de análisis específico para cada una de las fuentes y la fusión se lleva a cabo a nivel del descriptor o del tomador de decisiones.

34. http://www.scilogs.fr/complexites/le-tout-est-il-plus-que-la-somme-des-parties/

Por ejemplo, los descriptores específicos se pueden extraer desde cada una de las fuentes y entonces combinarse para explotar interacciones de más alto nivel entre las diferentes fuentes consideradas. Por último, las diferentes fuentes se pueden combinar en lo que se conoce como un proceso "extremo a extremo", en donde las etapas de procesamiento estándar se reemplazan por un sistema único (usualmente una red neurológica profunda) que toma las fuentes sin procesar como entrada y retorna las decisiones requeridas como salida (Charvat et al., 2018; Plaisant, 2004; Tonda et al., 2018).

En el caso de las series temporales, fusionar series con diferentes resoluciones temporales es un gran desafío, por ejemplo, si el sensor de actividad en un collar que lleva un animal envía información cada cinco minutos, pero el animal solo se pesa una vez al día. Para comparar individuos, puede que sea necesario interpolar la serie temporal por el mismo período de tiempo (utilizando métodos de suavizado lineal o polinomial), tal vez comparando similitudes (fechas de etapas fenológicas, picos de crecimiento, etc.). La distorsión dinámica del tiempo (Dynamic Time Warping) (Sakoe et al., 1978) es una de las técnicas bien conocidas para medir las similitudes entre dos series. Sin embargo, esta técnica no da respuesta a todos los problemas de alineación de curvas que surgen al tratar con seres vivos, cuando es fundamental tener en cuenta el tiempo fenológico. Estas interrogantes presentan desafíos que la biología aún tiene pendiente de resolver en su mayor parte.

Existen también métodos capaces de extraer varios modelos a partir de la serie temporal a diferentes escalas de tiempo y luego seleccionar los más relevantes y que usan enfoques de teoría de la información (principio de Longitud Mínima de Descripción – MDL) (Vespier et al., 2012). La ventaja de estos enfoques es que nos permiten centrarnos en la escala temporal de los fenómenos observados en lugar del valor técnico del muestreo.

En el caso de la teledetección, con la explosión del número de misiones satelitales (Sentinel, Spot, Pleiades y PleiadesNeo, PlanetScope, etc.), ahora es posible recopilar información que describe un área de estudio única a un costo menor en diferentes rangos espectrales (ópticos y de radar) y en diferentes escalas espacio temporales. Este volumen masivo de información de múltiples fuentes requiere el desarrollo de nuevas herramientas de gestión y análisis de datos. (Schmitt y Zhu, 2016). Típicamente, en un proceso clásico de fusión de múltiples fuentes para datos de observación de la Tierra, las fuentes se explotan a través de un proceso de fusión temprano. Por ejemplo, en el caso de imágenes a diferentes escalas espaciales, se incorpora una etapa de remuestreo para llevar de antemano todas las imágenes a la misma escala espacial. Desafortunadamente, este tipo de proceso puede introducir sesgos o errores al generar nueva información sintética. Esta es

la razón por la que ahora se prefieren los enfoques de fusión tardía cada vez que sea posible. Están comenzando a aparecer ejemplos tempranos en el contexto del mapeo del uso de terreno, pero todavía estamos lejos de una solución genérica que pueda implementarse sistemáticamente en diferentes territorios y adaptarse a diferentes prácticas agrícolas.

Por ejemplo...

En INRAE, el equipo **MISCA** de UMR **TETIS** desarrolla métodos de manejo de información para enfrentar los mayores desafíos de la sociedad relacionados con el medio ambiente, ya sea almacenar, compartir o analizar grandes volúmenes de datos. En particular, contribuye al mapeo de suelos mediante la aplicación de técnicas de Aprendizaje Profundo en conjuntos de datos muy grandes.

En Inria, varios equipos-proyecto (**GEOSTAT**, **TITANE**, **FLUMINANCE** (Inria, INRAE, Université de Rennes 1), etc.) y la acción exploratoria **AYANA** están trabajando en el análisis de imágenes satelitales.

Además de la información de múltiples fuentes puramente satelital, ahora se combinan otros tipos de información con datos de observación de la Tierra. Por ejemplo, la información de geolocalización "espontánea" o información proveniente de la ciencia ciudadana (Ienco et al., 2019) tiene mucho que ofrecer para mejorar la calibración y complementar la información puramente física que viene de los sensores satelitales.

Enfoques supervisados

El análisis supervisado consta principalmente de dos tareas: clasificación supervisada y predicción de valores futuros. La clasificación supervisada consiste en asignar, para una serie temporal dada y un conjunto de clases predeterminadas (por ejemplo, "animal enfermo" y "animal sano"), una de estas clases a la serie temporal. En términos prácticos, esto puede ayudar a determinar la condición de un animal o planta a partir de datos de sensores e información sobre las diferentes condiciones posibles. Los métodos de clasificación supervisados necesitan ser "entrenados"; para ello, se les debe proporcionar una gran cantidad de ejemplos correctamente etiquetados que indiquen su clase. Usando estos ejemplos, el algoritmo de clasificación construye uno (o más) modelo(s), para asignar una clase a una serie temporal no etiquetada según sus características. Las principales más

importantes entre las principales familias de enfoques de clasificación supervisada radican en la forma en que se construyen los modelos. Los enfoques más simples, conocidos como k-Nearest Neighbor (kNN), no construyen un modelo, sino que buscan los ejemplos k del conjunto de entrenamiento más cercano al individuo a etiquetar, y luego muestran la etiqueta de la mayoría. La dificultad yace en elegir un método de similitud adecuado (Karlsson et al., 2016).

Finalmente, los métodos más populares de redes neuronales profundas también se pueden usar para clasificar dichos datos. El método más exitoso de este tipo es actualmente MLSTM- FCN (Karim et al., 2019), que combina un bloque CNN (Red Neuronal Convolucional) convolucional con un bloque de LSTM (Memoria Larga de Corto Plazo). El bloque CNN, ampliamente utilizado en el análisis de imágenes, sirve como un filtro que atraviesa la serie o el espectro temporal y extrae los atributos característicos en el tiempo t. Se combina con el bloque de LSTM, que se utiliza ampliamente utilizado en el análisis de datos secuenciales (especialmente texto) y permite hacer conexiones entre valores pasados y actuales. Este tipo de enfoque puede producir excelentes resultados (Kamilaris y Prenafeta-Boldú, 2018). Sin embargo, requiere un volumen aún mayor de datos de capacitación etiquetados (que pueden ser difíciles de adquirir en algunos contextos agronómicos), y sus parámetros pueden ser difíciles de definir (Zhu et al., 2017).

Por ejemplo...

En Inria, el equipo-proyecto **STATIFY** (Inria, CNRS, Institut Polytechnique de Grenoble) se centra en el modelado estadístico de sistemas que involucran datos de estructura compleja. El equipo desarrolla métodos estadísticos para capturar la variabilidad de los sistemas estudiados asegurando un buen nivel de precisión y teniendo en cuenta valores extremos que generalmente reflejan fenómenos raros. En particular, ellos modelan eventos climatológicos para agroecología.

Se puede encontrar un ejemplo del uso de métodos de clasificación supervisados en agricultura en Fauvel et al. (2019), en donde los autores trabajan con datos provenientes de sensores de alimentación de precisión de vacas lecheras. Las vacas están equipadas con termómetros y collares con un acelerómetro. Se analizan las series temporales de temperatura y actividad física para permitir una detección más exacta del celo (estro) de lo que lo hacen los métodos existentes o la observación visual, incluso en los casos frecuentes donde las vacas no expresan ninguna conducta particular en la fase pre-estro (30%).

Enfoques no supervisados

Los enfoques no supervisados se utilizan para revelar ciertas estructuras en los datos, ya sea en agrupaciones de clusters o patrones recurrentes con minería de patrones secuenciales.

Agrupamiento en clusters – El objetivo del método de aprendizaje por clusters (o clasificación no supervisada) es identificar las clases relevantes en los datos. Los datos se agrupan por similitud o proximidad dentro de cada clase. Para lograr una buena clasificación, se debe minimizar la inercia intraclase (para obtener clases homogéneas) y maximizar la inercia interclase (para obtener clases bien diferenciadas). Comúnmente se utilizan dos familias principales de métodos: i) la clasificación ascendente jerárquica (HAC, por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es agrupar a los individuos de manera iterativa, comenzando desde abajo (los dos más cercanos) y donde se va construyendo gradualmente un árbol, o un dendrograma, y que finalmente agrupa a todos los individuos en una sola clase, en la raíz; ii) clasificación por reasignación dinámica (el algoritmo k-means es un ejemplo bastante famoso de esto). El número k de clases se fija a priori. Después de inicializar los centros de clase k, todos los individuos se asignan a la clase cuyo centro está más cercano en el sentido de la distancia elegida. El algoritmo entonces calcula los baricentros de estas clases que llegan a ser los nuevos centros. El proceso (asignación de cada individuo a un centro, determinación de los centros) se itera hasta que se converge en un número mínimo (local) o máximo fijo de iteraciones.

Los principales problemas a superar cuando se agrupan datos multivariados son identificar el número "correcto" de clases y definir una distancia que se adapte a los datos, lo que a veces implica la necesidad de reducir la dimensión. Una técnica común consiste en realizar un análisis de componentes principales en los datos y luego aplicar el clustering en las coordenadas de los datos en la base del vector propio (eigenbasis), con todas las dificultades de elegir las dimensiones que esto conlleva. El clustering por la combinación de procesos Dirichlet (Coquet et al., 2002) ofrece una forma de esquivar estas dificultades.

Minería de patrones secuenciales – Los patrones corresponden a regularidades/irregularidades implícitas o especificidades de los datos o subpartes de los datos. En aplicaciones agronómicas, un individuo se puede describir a través de una secuencia de características o eventos. Por ejemplo, una parcela se puede describir por medio de una secuencia de operaciones de cultivo, una planta se puede describir por medio de una secuencia de ADN, etc. uno de los principales desafíos con este tipo de datos es la extracción de subsecuencias frecuentes o infrecuentes.

Por ejemplo...

En INRAE, el trabajo de la UMR **TETIS** se centra en extraer subsecuencias frecuentes/infrecuentes en este tipo de datos y patrones frecuentes en forma de elementos y secuencias (secuencias de eventos ordenados en el tiempo) para caracterizar la diferencia en el crecimiento de la vegetación entre diferentes áreas espaciales. Su trabajo es particularmente importante para la estimación de humedales y el monitoreo de biodiversidad.

Otros enfoques apuntan a resaltar las subpartes de los datos con características muy diferentes al resto de los datos (diferencias de distribución para ciertos atributos, etc.). Por ejemplo, en Millot et al. (2020), los autores utilizan la noción de patrones discriminantes para caracterizar, a partir de datos de simulación, subfamilias de protocolos de cultivo en granjas urbanas donde parte de los atributos (temperatura, luz, CO2, etc.) muestran una distribución interesante con respecto a una determinada medición de interés.

Desafortunadamente, estos métodos a menudo se enfrentan a una serie de patrones que resultan ser demasiado grandes para que los expertos los utilicen fácilmente. Una vía prometedora y actualmente muy estudiada es la selección del subconjunto de patrones más relevantes. Los patrones se pueden extraer de series temporales después de una fase de preprocesamiento en la que la secuencia de valores numéricos se transforma en una secuencia de valores simbólicos, lo que permite aplicar los métodos clásicos de descubrimiento de patrones. Cuando se mantienen los datos numéricos, se pueden utilizar métodos para extraer subconjuntos representativos, llamados "shapelets".

Por ejemplo...

Las unidades de INRAE tales como las UMR **PEGASE**, **UMRH**, **Toxalim** y **GenPhyse**, usan estos diferentes enfoques de aprendizaje para la alimentación de precisión, detección temprana de anomalías en la actividad de las vacas lecheras en un rebaño, detección de patologías en lechones o análisis del comportamiento porcino, respectivamente.

Aprendizaje por refuerzo

Al igual que muchos tipos de datos, los datos agrícolas son a menudo inciertos (véase el apartado 3.1). El aprendizaje por refuerzo (RL, por sus siglas en inglés) se ocupa de aprender a operar en un entorno incierto. Un ejemplo de un uso moderno de RL para la planificación de la gestión de cultivos es Déciblé (Chatelin et al., 2005), que se origina en García (1999) y se basa en la interacción mediante un modelo de regla de decisión para el cultivo de trigo. Este simulador de cultivo empírico se utiliza para evaluar las políticas expresadas como conjuntos de reglas de decisión. En Ndiaye (1999), los métodos libres de modelos –principalmente Q-learning y R-learning– se mezclan con algoritmos genéticos, árboles de decisiones y lógica fuzzy para encontrar reglas de decisión óptimas para la gestión de cultivo en conjunto con Déciblé. Se consideró que el resultado no era tan bueno como las decisiones que un experto esperaría ver. Estos primeros enfoques fueron interesantes porque introdujeron técnicas modernas de RL para el manejo de cultivos a la vez que consideraban una variedad de acciones. Asimismo, expresaron una política optimizada de forma natural, es decir, en la forma de un conjunto de reglas de decisión simples correspondientes al razonamiento de los agricultores. Sin embargo, las soluciones en García (1999) y Ndiaye (1999) están limitadas, en el sentido de que el aprendizaje es offline o fuera de línea y utiliza un simulador empírico de modelo de decisión con sus propios sesgos y campo de validez. Debido a que el aprendizaje no es en tiempo real, los sistemas no utilizan la retroalimentación de los agricultores para mejorar la política aprendida del simulador.

Estos métodos se aplicaron posteriormente en un contexto más complejo, incorporando un modelo económico para el manejo de la colza oleaginosa y un componente de plagas y enfermedades en el modelado de cultivos (Trépos et al., 2014). Los métodos de RL se han aplicado con éxito en la planificación del riego cuando la disponibilidad de agua es limitada (Bergez et al., 2001). No obstante, cada decisión de gestión debe tener en cuenta toda la secuencia de opciones. Las diferentes variedades de cultivos tienen diferentes requerimientos de agua, por lo que habrá diferentes costos de riego. Bu and Wang (2019), propusieron una arquitectura computacional general para la toma de decisiones inteligente en la agricultura basada en el Q-Learning profundo. En la práctica, Q-learning profundo requiere miles de millones de instancias de prueba y error. Además, no se ha hecho ninguna propuesta para integrar conocimientos especializados (por ej., conocimientos de fisiología vegetal) en este sistema. Por lo tanto, se podrían considerar enfoques que utilizan el conocimiento experto (aprendizaje basado en modelos), lo que permite reducir en varios órdenes de magnitud la cantidad de ejemplos necesarios para la capacitación.

Por ejemplo...

El equipo-proyecto **SCOOL** (Inria, CNRS, Université de Lille) se especializa en el aprendizaje por refuerzo y está estudiando la recomendación de prácticas en agricultura para granjas muy pequeñas, especialmente en países en desarrollo, y en jardinería. La investigación se lleva a cabo con un enfoque de desarrollo sostenible.

Se implementan diferentes métodos de aprendizaje automático y ciencia de datos en la biblioteca scikit-learn, que se desarrolló principalmente en Inria y es una de las tres bibliotecas de inteligencia artificial más descargadas del mundo.

La unidad de INRAE **MIAT** también está trabajando en el desarrollo de métodos basados en los procesos de decisión de Markov y el aprendizaje por refuerzo aplicados a la gestión de sistemas agroecológicos, con especial atención a cuestiones relacionadas con la dimensión espacial de los problemas.

Almacén de datos y análisis OLAP

Los almacenes de datos (DW, por sus siglas en inglés) se diseñaron para que manejen grandes volúmenes de datos de fuentes heterogéneas (Chandra y Gupta, 2018). El modelado multidimensional (donde se caracterizan los datos a través de múltiples ejes de análisis) y el modelado jerárquico (donde un eje de análisis se puede asociar con diferentes niveles de granularidad) forman la base de los DW y el análisis multidimensional. Por ejemplo, el análisis de la cantidad de plaguicidas o nitrógeno utilizados por los agricultores se puede caracterizar según varias dimensiones (o ejes de análisis): temporal, espacial y a nivel de cultivo. (Bouadi et al., 2017). Esto permite que se representen cantidades por tipo de cultivo, estación y parcela. Estas dimensiones pueden ser expresadas en niveles diferentes de detalle. Por ejemplo, la información espacial se puede definir a escala de una sola parcela o a una escala mayor como la cuenca hidrográfica, región, etc., ya que cada parcela pertenece a una cuenca hidrográfica, que a su vez pertenece a una región, y que a su vez pertenece a un país.

El análisis multidimensional usa OLAP (Procesamiento Analítico En Línea) para agregar, visualizar e interactivamente explorar los datos. Si tomamos el ejemplo anterior, podríamos analizar la cantidad de pesticidas o nitrógeno a nivel de parcela

o a un nivel más agregado de dimensión espacial como la cuenca hidrográfica. Se utiliza el procesamiento OLAP para navegar entre las diferentes granularidades de una o más dimensiones de una forma muy eficiente (es decir, la navegación es instantánea).

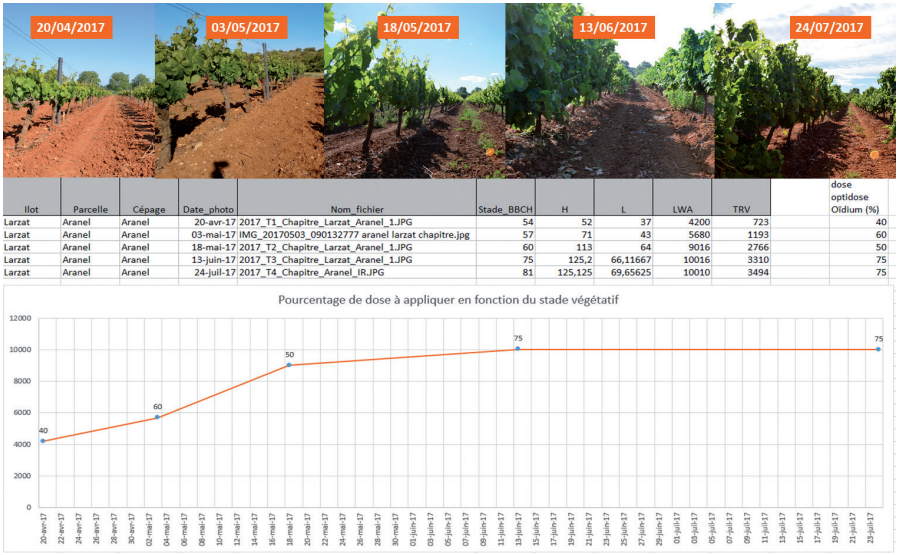
Los usuarios pueden utilizar el almacén de datos combinando las diferentes dimensiones y los diferentes niveles de granularidad de las jerarquías correspondientes. Para seleccionar los datos apropiados en la escala correcta, los usuarios expresan y envían consultas al almacén de datos.

Otros trabajos (Palpanas, 2000) describen el acoplamiento del análisis multidimensional con métodos de minería de datos (por ejemplo, minería de patrones secuenciales), con el objetivo de proponer métodos híbridos que combinen las capacidades exploratorias y analíticas de OLAP con las capacidades descriptivas de la minería de datos. Por ejemplo, la herramienta ADSS-OLAP (Abdullah y Hussain, 2006) combina OLAP y minería de datos (clustering) y fue desarrollado para analizar el impacto de la cochinilla harinosa y de los cultivos de algodón. A fin de mejorar aún más el análisis OLAP y permitir la extracción de datos geográficos, surgió la idea de unir las tecnologías OLAP y GIS (Sistema de Información Geográfica). Por lo tanto, el nuevo concepto de OLAP Espacial (SOLAP) (Bédard et al., 2007) fue introducido para explotar en conjunto las herramientas OLAP (decisión, grafos, etc.) y las herramientas geográficas (representación cartográfica, agregadores geográficos, etc.).

Por ejemplo...

En Inria, el equipo-proyecto **LACODAM** (Inria, Institut national des sciences appliquées de Rennes, Institut national supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage, Université de Rennes 1) ha modelado y construido un almacén de datos para analizar/explorar, en espacio y tiempo, los efectos de las prácticas agrícolas en las emisiones de nitrógeno hacia el agua y el aire (Bouadi et al., 2017). El equipo también está estudiando el uso del aprendizaje automático para mejorar el bienestar del animal (salud de las vacas lecheras y alimentación de las cerdas).

En INRAE, el trabajo de la unidad **TSCF** se centra en OLAP espacial. Entre otras cosas, contribuye al almacenamiento y análisis de los datos de biodiversidad en línea, en particular a través del proyecto VGI4BIO (www.vgi4bio.fr) que propone métodos para analizar los indicadores de biodiversidad en un contexto agrícola en torno a los datos y los usuarios VGI.



Ilot	Parcelle	Cépage	Date_photo	Nom_fichier	Stade_BBCH	H	L	LWA	TRV	dose optidose Oïdium (%)
Larzat	Aranel	Aranel	20-avr-17	2017_T1_Chapitre_Larzat_Aranel_1.JPG	54	52	37	4200	723	40
Larzat	Aranel	Aranel	03-mai-17	IMG_20170503_090132777 aranel larzat chapitre.jpg	57	71	43	5680	1193	60
Larzat	Aranel	Aranel	18-mai-17	2017_T2_Chapitre_Larzat_Aranel_1.JPG	60	113	64	9016	2766	50
Larzat	Aranel	Aranel	13-juin-17	2017_T3_Chapitre_Larzat_Aranel_1.JPG	75	125,2	66,11667	10016	3310	75
Larzat	Aranel	Aranel	24-juil-17	2017_T4_Chapitre_Aranel_IR.JPG	81	125,125	69,65625	10010	3494	75

Optidose® una herramienta para adaptar la dosis de acuerdo a los parámetros del cultivo y el riesgo epidémico. © *Le Mas Numérique.*

3.4 Gestión del conocimiento e ingeniería para apoyar la toma de decisiones en la agricultura

Las secciones anteriores proporcionaron una descripción general del estado de arte y tecnología de vanguardia en la recopilación, gestión y procesamiento de datos. Asimismo, vimos cómo el modelado permite administrar y representar el conocimiento de una manera matemática usando mediciones y observaciones para ayudar con la interpretación y la recomendación. Otra faceta importante de la agricultura digital es la gestión del conocimiento, es decir, la información de alto nivel que incluye tanto conocimientos científicos generales (p. ej., procesos fisiológicos de plantas o animales) como métodos específicos de determinados actores del sector agrícola (p. ej., gestión del rebaño de un ganadero, metodología para fabricar ciertos quesos, etc.). En los últimos años, se han hecho esfuerzos significativos para formalizar este conocimiento y organizarlo en ontologías que entreguen un acceso estructurado. Las ontologías son un componente de los sistemas informáticos que ayudan a los usuarios a lograr una tarea. Esta ayuda puede tomar muchas formas, desde la automatización de una decisión de riego hasta encontrar información para ayudar a tomar una decisión. También se puede generar conocimiento por medio

de los análisis presentados arriba. En este caso, la dificultad yace en presentar estos análisis a los actores humanos en la mayoría de las formas inteligibles. Nuevamente, los recientes desarrollos en los análisis de datos son de particular interés para la agricultura, ya sea por medio de enfoques o métodos de visualización para interpretar los modelos de aprendizaje. Por último, el objetivo de todo lo que se presenta en esta sección es permitir a los actores humanos tomar mejores decisiones. Las herramientas específicas como DSS (Sistemas de Apoyo en la Toma de Decisión) que usan todas o algunas de las técnicas presentadas en este capítulo están disponibles para estos actores y están constantemente evolucionando. Esta sección concluirá con una descripción general de estas herramientas.

Por ejemplo...

La UMR **BIOEPAR** contribuyó al desarrollo de **EMULSION**, un programa de fuente abierta y DSS basado en inteligencia artificial. **EMULSION** permite a los modeladores desarrollar modelos mecanicistas estocásticos de sistemas complejos en relación con la epidemiología a diferentes escalas y utilizando diferentes paradigmas, al tiempo que reduce la cantidad de código informático que debe escribirse (Picault et al., 2019). En base a esto, el proyecto **ATOM** (Automatización de Herramientas de Ayuda en la Toma de Decisiones en base a Modelos epidemiológicos) apunta a desarrollar un proceso para la industrialización de la generación de DSS usando modelos epidemiológicos mecanicistas (https://www6.angers-nantes.inrae.fr/bioepar/Recherche/Projets-en-cours/ATOM).

Sistemas basados en conocimiento en la agricultura

Desde los primeros sistemas especializados a los sistemas basados en el conocimiento – Los primeros sistemas especializados surgieron en los años 70 a raíz de la investigación de la inteligencia artificial. Estos sistemas estaban dedicados a resolver un problema específico utilizando el conocimiento de uno o más expertos e imitando su razonamiento, con el objetivo final de reemplazarlos. En un enfoque, llamado enfoque simbólico, el conocimiento experto se formaliza utilizando un lenguaje de representación del conocimiento basado en el razonamiento lógico. Esto contrasta con el enfoque conexionista, que imita el funcionamiento del cerebro humano utilizando redes neuronales.

Una particularidad del sector agrícola es que los problemas inherentes al manejo de cultivos o rebaños requieren conocimientos especializados en varios

campos (ciencia del suelo, meteorología, química, biología, etc.). Para satisfacer esta demanda de experiencia multidisciplinaria, algunos sistemas especializados incorporan modelos de simulación como componentes, tales como los descritos en el apartado 3.2. Un ejemplo de ello es el sistema experto "CrOp MAnagement EXpert" (COMAX), dedicado al cultivo de algodón, que apunta a maximizar la producción mientras minimiza los insumos (McKinion y Lemmon, 1985) y encapsula un modelo de simulación de desarrollo de algodón (GOSSYM). Debido a que la adquisición de conocimiento experto es fundamental para el desarrollo de sistemas especializados, la ingeniería del conocimiento se ha centrado en los métodos para adquirir dicho conocimiento. Estos métodos han sido utilizados para guiar a los científicos cognitivos a través de las complejas tareas de identificar, extraer y formalizar el conocimiento experto proveniente de una variedad de fuentes (entrevistas a expertos u otros documentos que describen la tarea de resolver el problema).

Muy populares en la década de los 80, los sistemas especializados también han sido severamente criticados por no ser adaptables a aplicaciones distintas a las que fueron diseñadas y por ofrecer poco potencial de desarrollo. En la década de los 90, los sistemas especializados evolucionaron gradualmente hacia sistemas basados en el conocimiento. Fue entonces que apareció la noción de ontología en la ciencia computacional. Las ontologías están diseñadas para formalizar el conocimiento consensuado y relativamente estable en un dominio dado para permitir su reutilización en otros sistemas basados en el conocimiento.

Un sistema basado en el conocimiento se compone de dos partes distintas: en primer lugar, una base de conocimiento que incluye una ontología que estructura el conocimiento del dominio, con una base de hechos que ejemplifica la ontología para describir situaciones específicas y, a veces, una base de reglas que enriquece la ontología; y en segundo lugar, un motor de razonamiento asociado al lenguaje de representación del conocimiento pero independiente de cualquier base de conocimiento en particular.

Evolución de la adquisición de conocimientos y métodos de capitalización – El cambio hacia los sistemas basados en el conocimiento vino acompañado de un cambio en la concepción de la relación entre humanos y máquinas. Los sistemas basados en el conocimiento y su sistema informático inteligente asociado tienen como objetivo cooperar con el usuario para ayudarlo a realizar una tarea que requiere diferentes tipos de conocimiento, complementando el conocimiento del usuario, revelando las consecuencias de sus elecciones y proponiendo opciones alternativas a las que habría imaginado. Luego, la ingeniería del conocimiento evolucionó hacia una forma de mediación de modelado del conocimiento, produciendo

"modelos de conocimiento". Un modelo aquí adquiere un significado diferente y más global que aquel descrito en el apartado 3.2, debido a que ya no representa fenómenos, sino que conocimiento. Estos modelos permiten al científico cognitivo, encargado de la implementación en un sistema informático, dialogar con expertos para enriquecer y validar el conocimiento que se va a representar. Con el objetivo de ayudar a esta mediación, se han desarrollado varios métodos, siendo el más conocido el de "Adquisición de Conocimiento y Estructuración de Documentación" (KADS, por sus siglas en inglés, del cual se desarrolló más tarde commonKADS). Por ejemplo, se desarrolló un sistema para recomendar fechas de riego para árboles de mango utilizando el método commonKADS. (Nada et al., 2014).

Por ejemplo...

El equipo-proyecto **GRAPHIK** (Inria, INRAE, CNRS y Université de Montpellier) estudia la representación del conocimiento. Entre otras cosas, el equipo está trabajando en un método para recopilar, modelar y formalizar conocimientos para mejorar la calidad de los quesos locales. La recopilación de datos se realiza a través de cuestionarios; el modelado se realiza mediante la creación de mapas mentales para facilitar la validación por parte de expertos y la formalización se lleva a cabo utilizando un lenguaje gráfico conceptual.

Los modelos de conocimiento se implementaron en otros sistemas informáticos, como los sistemas de búsqueda de información (fuente). Este desarrollo llevó a la creación de "memorias organizacionales". Una memoria organizacional es el conjunto de recursos humanos y materiales –transportadores de conocimiento– que permiten que una organización lleve a cabo sus tareas. Una memoria puede estar compuesta de un conjunto de documentos de texto, videos, listas de habilidades de empleados y uno o más modelos de conocimiento. La formalización de estos modelos permite que ellos se utilicen automáticamente para ayudar a la circulación de recursos y conocimientos entre los miembros de la organización. Esta formalización a menudo toma la forma de un tesauro: una lista estructurada de términos estandarizados organizados en tres tipos de relaciones (equivalencia, jerarquía, asociación), con el objetivo de indexar y ayudar a buscar diferentes contenidos.

Más información

La FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) ha sido fundamental en la producción de memorias organizacionales en el campo agrícola (O'Leary, 2008). Su base de datos bibliográficos AGRIS ofrece diferentes tipos de recursos (documentos científicos, conjuntos de datos, etc.) en varios idiomas. Estos recursos son indexados utilizando el tesauro AGROVOC, que ahora es una de las herramientas importantes en el campo agrícola (Sini et al., 2008). Este tesauro abarca muchos aspectos del dominio agrícola y se puede adaptar a las necesidades de una nueva organización. Un ejemplo de memoria organizacional es el proyecto Agropedia, dirigido por varios institutos agrícolas indios en colaboración con la FAO (Pappu et al., 2010) para transformar el conocimiento científico de universidades en conocimiento práctico de uso para agricultores. Agropedia utiliza modelos de conocimiento Topic Map, que agregan todo el conocimiento necesario para un cultivo determinado.

Acceso semántico a las fuentes de información – El nacimiento de la Web Semántica a principios de la década de 2000 tuvo un fuerte impacto en el área de la representación del conocimiento. La tecnología de la Web Semántica comprende un conjunto de lenguajes estandarizados, protocolos y herramientas bajo los auspicios de W3C para permitir la explotación automatizada de recursos en la Web de acuerdo a su contenido. Los recursos en la Web (como documentos HTML o, más ampliamente, cualquier dato disponible en la Web) son anotados con metadatos que describen su contenido en un lenguaje formal, constituyendo una base compilado de hechos que puede ser enriquecida con un tesauro u ontología que especifique su semántica.

Definición

Los principales lenguajes formales de la Web Semántica son:

- Marco de Descripción de Recursos (RDF, por sus siglas en inglés): el lenguaje para describir los recursos de la Web en la forma de un grafo compuesto de triples semánticos (sujeto, predicado, objeto);
- Esquema RDF (RDFS, por sus siglas en inglés): una extensión de RDF que permite que se defina un vocabulario en términos de clases y propiedades (o predicados binarios) organizados por especialización;
- Protocolo SPARQL y Lenguaje de Consulta RDF (SPARQL): el lenguaje de consulta de descripción RDF(S);
- Lenguaje de Ontologías Web (OWL): el lenguaje más usado comúnmente para describir las ontologías de la Web Semántica;
- Lenguaje de Regla de la Web Semántica (SWRL): un lenguaje de regla que puede utilizarse para enriquecer las descripciones de OWL;
- Sistema de Organización de Conocimiento Simple (SKOS, por sus siglas en inglés): La especificación de RDFS para la formalización de terminologías, tesauros, clasificaciones y otros vocabularios usados en los sistemas de recuperación de información.

Las ontologías Web son modulares y se centran en una necesidad específica para facilitar su reutilización y uso combinado. Al ponerlas a disposición de la web, se puede mejorar la interoperabilidad entre los sistemas basados en el conocimiento. La iniciativa del grupo de trabajo de la RDA Agrisemantics es de particular interés. Este grupo ha estado explorando el uso de esta tecnología y recursos asociados para mejorar el intercambio de datos agrícolas (Aubin et al., 2017). Esta tecnología ha permitido que se traspasen las memorias organizacionales a la Web.

Por ejemplo...

INRAE también está desarrollando memorias organizacionales sobre el impacto del cambio climático en las prácticas agrícolas y la agroecología. Se recopiló un archivo de boletines de información agrícola franceses, los Boletines Fitosanitarios (BSV), durante el proyecto VESPA, que estudió las redes de vigilancia epidemiológica (Roussey et al., 2017).

Se desarrolló el portal web colaborativo GECO (https://geco.ecophytopic.fr/) para mejorar el intercambio de conocimientos en relación con la protección integrada de los cultivos y la agroecología. Este portal gestiona un conjunto de fichas explicativas para proponer medios de control de plagas (Soulignac et al., 2017). GECO permite a los usuarios realizar búsquedas independientemente de su nivel de conocimientos.

Las ontologías web y los tesauros SKOS se han convertido en recursos reutilizables. Se han desarrollado portales específicos para la búsqueda de todos estos recursos.

Por ejemplo...

En INRAE, el departamento de informática de la UMR **MISTEA** ha desarrollado, entre otras cosas, el AgroPortal (http://agroportal.lirmm.fr/), que enumera ontologías y tesauros relacionados con la agronomía y la agricultura y los pone a disposición del público. AgroPortal también ofrece servicios para ayudar a anotar documentos de texto y detectar enlaces entre conceptos de dos ontologías (alineación de ontologías). También contribuye a los avances en el fenotipado de plantas de alto rendimiento.

Integración semántica de datos estructurados – Linked Data, o datos enlazados, se refiere a una red de conjuntos de recursos enlazados. Se desarrolló en la década de 2010 y marcó una nueva etapa con respecto al intercambio de datos utilizando la tecnología de la Web Semántica, al implementar una red de conjuntos de recursos interconectados. Esta red se basa en el uso de vocabularios compartidos (tesauros, ontologías, etc.) utilizados para describir los datos. Esta evolución va acompañada de la generalización del concepto de datos y abarca todos los datos, incluidos aquellos estructurados a partir de diferentes bases de datos.

Por ejemplo...

Algunos ejemplos de datos estructurados son:

Los datos meteorológicos de una estación de INRAE están disponibles como Linked Data, o datos enlazados (http://meteo.clermont.cemagref.fr/).. Una ontología central de la Red de Sensores Semánticos (SSN por sus siglas en inglés) proporciona un patrón de diseño para describir las mediciones.

El proyecto europeo SmartOpenData (http://www.smartopendata.eu/) propuso una infraestructura (y un esquema SmartOpenData (SMOD)) para gestionar datos abiertos y enlazados en el ámbito de la biodiversidad y el medioambiente (por ejemplo, en la gestión de datos sobre la agrosilvicultura).

El proyecto Agronomic Linked Data (AgroLD - http://www.agrold.org) integra 50 bases de datos en una única base de datos RDF. Su objetivo es cuestionar y vincular a la vez diferentes puntos de vista en relación con las plantas cultivadas (genómicos, proteómicos y fenoménicos), validados por al menos una de las diez ontologías web utilizadas (Gene Ontology, Plant Trait Ontology, etc.).

Se utilizan arquitecturas híbridas como *OpenSilex* (http://www.opensilex.org/) que incorporan ontologías, un motor de inferencia y diferentes formatos de bases de datos (relacionales, NoSQL, RDF) para desarrollar múltiples sistemas de información para el fenotipado de alto rendimiento. En esta arquitectura, un objeto científico (una planta, maceta, campo, etc.) es identificado mediante un identificador web (URI) y tipificado por un elemento de una de las ontologías asociadas. La base de datos RDF almacena los metadatos descriptivos estáticos, mientras que la base de datos NoSQL almacena los flujos de datos en bruto, como fotos de drones, series temporales de sensores de campo, etc.

Por ejemplo...

El sistema de información GnpIS almacena todos los datos estructurados de los experimentos realizados en relación con el fenotipado de plantas (Pommier et al., 2019). Las ontologías propuestas por la red Crop Ontology (https://www.cropontology.org/) se utilizan como diccionarios para todos los rasgos observables en los experimentos.

En el caso de los animales, las descripciones de los experimentos con animales llevados a cabo en diferentes centros de investigación pueden compatibilizarse utilizando una red de ontologías web desarrollada en INRAE. La red consta actualmente de tres ontologías web (Salaun et al., 2018): Animal Trait Ontology for Livestock (ATOL, sobre rasgos fenotípicos en el ganado), Environment Ontology for Livestock (EOL, sobre parámetros ambientales en la ganadería) y AHOL (para la salud del ganado).

Arquitecturas emergentes – Además de la Web de Datos, el problema de la explotación inteligente de datos cada vez más grandes y heterogéneos ha dado lugar a una investigación muy activa, que combina la representación del conocimiento, la gestión de datos, la web semántica, la minería de datos y el aprendizaje, etc. Es dentro de este marco en el que se ha propuesto una nueva arquitectura denominada Acceso a Datos Basado en Ontologías (OBDA por sus siglas en inglés) (Xiao et al., 2018), que combina un enfoque específico de integración de datos, denominado mediación, con el concepto del sistema basado en el conocimiento. Los sistemas OBDA se estructuran en tres niveles: el nivel conceptual, organizado en torno a una ontología (descrita, por ejemplo, en RDFS u OWL); el nivel de datos, compuesto por varias bases de datos preexistentes e independientes; y el nivel de mapeo, que traduce los datos pertinentes para la aplicación de destino en una base de datos utilizando el vocabulario de la ontología. Las consultas al sistema (por ejemplo, en SPARQL) utilizan este vocabulario y el usuario se expresa a nivel conceptual sin conocer el sistema de almacenamiento de datos (por ejemplo, una consulta como "¿qué auxiliares pueden controlar la plaga X y cuáles son las técnicas asociadas que limitarían la competencia con el cultivo principal?" estaría completamente desvinculada de los esquemas de las bases de datos subyacentes).

Por ejemplo...

En INRAE, la unidad de la URFM Ecología de los Bosques Mediterráneos del departamento **ECODIV** realiza investigaciones multidisciplinares en ecología. En particular, implementa sistemas OBDA maduros como Ontop (https://ontop-vkg.org/) y MASTRO (https://www.obdasystems.com/mastro) para la gestión sostenible de los ecosistemas forestales mediterráneos.

En el contexto de la Internet de las cosas, algunos de estos sistemas utilizan también tecnologías de la web semántica (ontología OWL, reglas SWRL, base de anotaciones RDF).

Organismos de normalización como el W3C y el ETSI trabajan actualmente en la validación de nuevas normas y ontologías para combinar la Internet de las cosas y la web semántica: se trata de la ontología SAREF del ETSI y la ontología de la Web de las cosas (WoT) del W3C. Estas ontologías aún no han alcanzado un nivel de madurez suficiente para ser utilizadas en aplicaciones de la vida real.

Por ejemplo...

En INRAE, la unidad **TSCF** ha propuesto una traducción del método de riego manual IRRINOV a reglas SWRL y a una red de ontología web para representar el conocimiento para la automatización del riego.

Siguen existiendo interrogantes sobre la compatibilidad de las ontologías construidas a partir de principios diferentes: usos diferentes, autores diferentes, ontologías fundacionales diferentes, etc. Algunas ontologías web proponen esquemas de datos correspondientes a patrones reutilizables (patrones de diseño) centrados en una necesidad específica. Otras ontologías ofrecen clasificaciones de referencia para calificar los datos. Los gestores de datos deben por tanto construir una red de ontologías para estructurar sus datos, comprobando que estas ontologías siguen siendo compatibles entre sí. ¿Se basan en los mismos patrones? ¿Permiten hacer inferencias correctas? Por último, los temas de investigación actuales se centran en cuestiones relativas a la distribución del razonamiento sobre todos los componentes de un sistema del tipo “Internet de las cosas”.

Restitución del conocimiento, visualización y la interacción hombre-máquina en la agricultura

Los métodos de producción de conocimiento basados en datos (apartado 3.3) han producido resultados que no tan solo son cada vez más precisos y fiables, sino también cada vez más difíciles de entender, hasta el punto de que la mayoría de estos enfoques se describen ahora como "cajas negras", de las que el usuario no puede entender los determinantes del resultado producido (por ejemplo, una decisión sobre el proceso técnico). Una solución a este problema consiste en utilizar enfoques de interpretabilidad local como LIME (Ribeiro et al., 2016) o SHAP (Lundberg y Lee, 2017). En lugar de pretender explicar el modelo aprendido como un todo, lo cual es demasiado complejo, estos enfoques explican las razones que llevaron al modelo a elaborar esa decisión en el caso concreto proporcionado por el usuario, es decir, los atributos que más contribuyeron (positiva o negativamente) a la decisión. Por ejemplo, el SHAP, utilizado en la detección del celo, como se explicó en el apartado anterior (Fauvel et al., 2019), proporciona explicaciones del tipo "se predijo un celo hoy en base a los cambios de temperatura de los últimos tres días y un período de descanso significativo hace tres días".

Paralelamente a la cuestión de la interpretabilidad, la representación visual de los datos y la información es esencial para cualquier sistema informático diseñado pensando en la interacción con el usuario. "Visualizar" consiste en producir elementos visuales (gráficos, curvas, mapas, imágenes) para ayudar a los usuarios a entender, explorar y analizar para dar sentido a los datos, modelos e información, a veces presentes en grandes cantidades y a menudo complejos (Kubicek et al., 2013). Unas interfaces hombre-máquina y unas visualizaciones fluidas y eficaces suelen ser esenciales para que los sistemas digitales destinados al público en general puedan funcionar con éxito. El ámbito de la agricultura no es una excepción a la regla.

Existe una gran demanda de visualización en este sector debido a la combinación de varios factores: el crecimiento significativo de las masas de datos recogidos, la existencia de usuarios que no son informáticos, pero que a menudo son tecnófilos, y la necesidad de dar visibilidad a los datos privados y públicos a diferentes escalas espaciales y temporales. La visualización se considera a veces incluso una cuestión estratégica, ya que el dominio de estas técnicas puede ofrecer una ventaja competitiva o conceder cierto poder a algunos actores de la cadena agroalimentaria. Los actores privados (fabricantes de equipos) están

muy comprometidos en este campo, pero también existen iniciativas por parte de universidades e institutos, como INRAE e Inria, disponibles bajo licencias gratuitas (por ejemplo, AQUAPONY,[35] *GeoVisage*,[36] *PARCHEMIN*)[37] o participativas (I-EKbase[38]) (Wachowiak et al., 2017).

Por ejemplo...

En INRAE, el grupo de Ecología y Evolución de las Zoonosis de la UMR del **CBGP** analiza la diversidad viral de los hantavirus y los procesos evolutivos que la conforman. Entre otras cosas, han puesto a prueba el desarrollo de AQUAPONY, un navegador web que permite explorar de manera interactiva las jerarquías filogenéticas y facilita la interpretación objetiva de los escenarios evolutivos.

Las herramientas desplegadas actualmente para el mundo agrícola se basan en los paradigmas tradicionales de visualización: cartografía (SIG, o Sistemas de Información Geográfica), interfaces de visualización de datos de sensores, colecciones de visualizaciones enlazadas (de múltiples facetas) y herramientas reactivas (consultas dinámicas). Las interfaces semánticas y las estrategias de visualización asociadas (vistas enlazadas) son temas de gran interés, así como la visualización en 3D, que permite ver la topología de las zonas geográficas (hasta los perfiles de los campos), y el uso de la síntesis de imágenes o incluso de la realidad aumentada.

Por ejemplo...

En INRAE, la UMR de **SAS** apoya la transición agroecológica de los sistemas ganaderos y los territorios. En particular, participó en el proyecto PARCHEMINS sobre la visualización de datos agrícolas costeros en Bretaña, finalizado en marzo de 2021. Este proyecto desarrolló un visor de mapas, una herramienta de consulta de mapas basada en la web que permite al usuario interactuar con los datos geográficos. Diseñado para usuarios que no son expertos en geomática ni informáticos, permite representar y analizar la información espacial de forma intuitiva y fácil de usar.

35. http://www.atgc-montpellier.fr/aquapony/
36. http://geovisage.nipissingu.ca/
37. http://www.parchemins.bzh/index.php/outil-de-visualisation-donnees-lagriculture-littorale-bretagne/
38. http://iekbase.com/hot-spots-monitoring

La interactividad y la rapidez de respuesta de las herramientas de visualización son fundamentales en la agricultura (y en cualquier otra parte), ya que estas visualizaciones deben adaptarse a dispositivos ligeros (smartphones, tabletas) o a terminales de a bordo (tractores conectados). La fluidez de la visualización de datos está estrechamente relacionada con las soluciones técnicas, los protocolos de intercambio de datos y la arquitectura del sistema. La visualización adaptativa, que es actualmente un tema de investigación importante, permite adaptar la visualización al contexto, como la profesión del usuario, los terminales de visualización o la naturaleza de los datos disponibles.

La cuestión de la visualización y la puesta en común de los conocimientos no se aborda ampliamente en la práctica y, por lo tanto, permanece por el momento más en el ámbito de la investigación que en el de la aplicación. Sin embargo, en la agricultura, los conocimientos humanos desempeñan tradicionalmente un papel muy importante, lo que crea un contexto especialmente favorable para el desarrollo de técnicas interactivas: en efecto, es tentador combinar las capacidades humanas de los expertos con algoritmos de aprendizaje, optimización o modelado (Boukhelifa et al., 2018). En función de la estrategia y del sistema, la interacción persona-computadora (HCI por sus siglas en inglés) puede ser explícita (el usuario recibe regularmente preguntas a través de una interfaz o de un sistema de visualización) o implícita (desconocida por el usuario o no verbal, donde la máquina capta información y la utiliza como base de aprendizaje). La investigación actual en visualización y HCI se centra principalmente en cuestiones relativas a la interpretabilidad, explicabilidad, causalidad y transparencia de las interacciones.

El tándem HCI/visualización es también un factor en los marcos en los que se requiere la experiencia humana para gestionar la incertidumbre de los datos y la toma de decisiones en relación con cuestiones de criterios múltiples: los enfoques cualitativos son complementarios a los enfoques automáticos/estadísticos (por ejemplo, la elección de criterios) para gestionar las ambigüedades, las lagunas de conocimiento o las extrapolaciones a diferentes tipos de cultivos. Algunos ejemplos son los usos en la zonificación agroecológica –basada en técnicas de agrupación y segmentación– o la aplicación web Crop-GIS, que combina el modelado y la visualización para la gestión de cultivos de maíz[39]. Sin embargo, los sistemas interactivos pueden ser difíciles de evaluar porque, si bien el algoritmo aprende y se adapta al ser humano, también ocurre lo contrario: el usuario aprende a utilizar un sistema.

39. https://www.cropgis.com/

Para comprender estos sutiles mecanismos de coadaptación y coevolución es necesario utilizar enfoques de ciencia experimental (planes de prueba, fiabilidad de los resultados, sesgos) y realizar pruebas con cohortes de voluntarios.

En conclusión, los temas de visualización y HCI aplicados a la agricultura se abordan relativamente poco en la literatura científica tanto agronómica como de visualización. Y, sin embargo, el tema es un factor clave en la adopción de la tecnología, ya que los agricultores prefieren las herramientas menos precisas pero fáciles de usar a las de alto rendimiento que son difíciles de utilizar (Pierpaoli et al., 2013).

Sistemas de apoyo a la toma de decisiones (Decision Support Systems o DSS)

En la década de 1980, los programas informáticos y la electrónica comenzaron a utilizarse para mejorar la eficacia de la agricultura y el razonamiento en las actividades agrícolas. Así surgieron los primeros DSS (Decision Support Systems) digitales. Este desarrollo revolucionario ha sido bastante bien recibido tanto por los agricultores (el 79% de los agricultores que utilizan las nuevas tecnologías reconocen su utilidad, fuente: Rapport agriculture et innovation 2025)[40] como en la sociedad, donde existe una demanda de innovaciones digitales para la protección del medio ambiente (el 47% de los encuestados, encuesta OpinionWay, 2016). Los DSS digitales se basan en una "simple" programación informática combinada con un conjunto relativamente pequeño de datos de referencia y pueden instalarse en computadores personales o utilizarse en una interfaz web que permita el acceso a la aplicación. Suelen ser desarrollados por institutos de investigación o técnicos. Esta generación de DSS incluye software como *INRAtion*[41] e *InraPorc*[42]. Estos programas, diseñados por el INRA, son la herramienta francesa de referencia en términos de ayuda para la definición de las raciones alimentarias para rumiantes y cerdos. También se han desarrollado muchos programas informáticos en el sector vegetal para ayudar a los agricultores a planificar y gestionar la fertilización de los cultivos, el control de plagas o el riego. Hoy, con el auge de la tecnología digital, ha surgido una nueva generación de DSS que utiliza tecnología digital contemporánea como la teledetección, el GPS, el Internet de las cosas, la inteligencia artificial, etc. Estos DSS son diseñados y producidos por el sector AgriTech, en el que participan las principales agroindustrias y numerosas empresas de nueva creación (Padhy y Satapathy, 2020).

40. https://agriculture.gouv.fr/sites/minagri/files/rapport-agriculture-innovation2025.pdf
41. https://www.inration-ruminal.fr/
42. https://inraporc.inra.fr/inraporc/

Definición

Agritech es un término genérico para referirse a la tecnología agrícola. Incluye cuatro áreas principales: 1/ biocontrol, 2/ big data agrícola, 3/ robótica y 4/ genética y biotecnología vegetal. Estos cuatro elementos suelen estar estrechamente relacionados y muchas tecnologías agrícolas se derivan de ellos.

La integración de las nuevas tecnologías en los DSS permite ampliar el abanico de servicios que ofrecen estas herramientas para que los agricultores tomen las decisiones de gestión de la explotación más adecuadas (Spanaki et al, 2021). El conocimiento preciso del estado de las parcelas agrícolas o de los rebaños es esencial para el agricultor, que ahora puede utilizar los datos (imágenes, mediciones biofísicas, etc.) de los sensores conectados para obtener más información de la que se puede percibir a simple vista. Tras varios procesos digitales, el agricultor puede acceder a esta información a través de una aplicación dedicada en línea o en un smartphone. En el sector ganadero, estas nuevas herramientas digitales son fácilmente adoptadas por los ganaderos si prometen ganancias técnicas y económicas y pueden reducir la dureza del trabajo. En primer lugar, existen DSS basados en los sensores que portan los animales (externos o internos), que permiten medir en tiempo real las características fisiológicas del animal y su actividad (temperatura, sensores de presión abdominal, movimiento, etc.). En la ganadería lechera, el ganadero puede utilizar estas herramientas para supervisar el ciclo reproductivo del animal y detectar de forma fiable el ciclo reproductivo del animal o el parto o los problemas de salud, incluso antes de que un profesional pueda detectar cualquier signo externo. Asimismo, estamos presenciando la aparición de prototipos de DSS basados en el reconocimiento de imágenes (a partir de cámaras instaladas en la granja) mediante métodos de inteligencia artificial (deep learning). Estos permiten vigilar el comportamiento y la salud de los animales y pueden llegar incluso al reconocimiento facial. Si se detecta una anomalía en un grupo o animal, se puede enviar una alerta al smartphone del ganadero. A pesar del número de iniciativas en curso, algunas cuestiones, cruciales para que un DSS sea utilizado y utilizable por los profesionales, siguen siendo objeto de investigaciones realizadas en colaboración con estos últimos. En concreto, se trata de la precisión, la pertinencia (un DSS que proporciona demasiadas falsas alertas, por ejemplo, corre el riesgo de ser rechazado), la adecuación y la forma de la información puesta a disposición del agricultor en función de sus conocimientos y necesidades y la ergonomía de la herramienta, todo en relación con las nociones vistas en el apartado sobre la visualización y HCI (Li et al., 2020). El modo en que se utiliza el conocimiento del usuario es también objeto de las cuestiones éticas que se plantean en relación con

la innovación abierta en general.

3.5 Automatización, control y robótica

Como se ha señalado anteriormente, la agricultura digital no se limita a la adquisición y el procesamiento de datos. El objetivo es utilizar estos datos en la toma de decisiones y determinar las acciones a realizar, tanto espacial como temporalmente, para optimizar las técnicas de cultivo capaces de conciliar altos niveles de producción, calidad de los cultivos y conservación del medio ambiente. En este sentido, se requerirá un trabajo preciso y potencialmente frecuente para cumplir dichas especificaciones, lo que no siempre es posible en términos de recursos y capacidades humanas. Esto es especialmente cierto porque las tareas agrícolas suelen ser tediosas y a veces peligrosas. Por ello, aprovechar todo el potencial de los principios de la agricultura digital podría conllevar a la automatización de las tareas. En la actualidad, la tecnología robótica está llevando aún más lejos los desarrollos ya implementados en el contexto de las herramientas automatizadas o los sistemas de asistencia al conductor para la maquinaria agrícola. No obstante, más allá de la automatización de ciertas tareas, los avances en el campo de la robótica en el mundo agrícola deben allanar el camino para un cambio de prácticas que acompañe la transición ecológica.

Farmstar es un DSS basado en imágenes espaciales subcelulares. Fue desarrollado por Airbus en colaboración con institutos técnicos agrícolas. La compleja cadena de procesamiento combina el uso de imágenes espaciales y otras fuentes de datos, como los datos climáticos, y utiliza la simulación informática para los modelos agronómicos. Se puede acceder al resultado a través de APIs (Application Programming Interfaces) que son consultadas por la aplicación del usuario. De este modo, el agricultor puede obtener información útil en forma de mapas e indicadores de "cuadro de mando" a través de una aplicación web integrada que oculta la compleja arquitectura informática y los flujos de datos implicados..

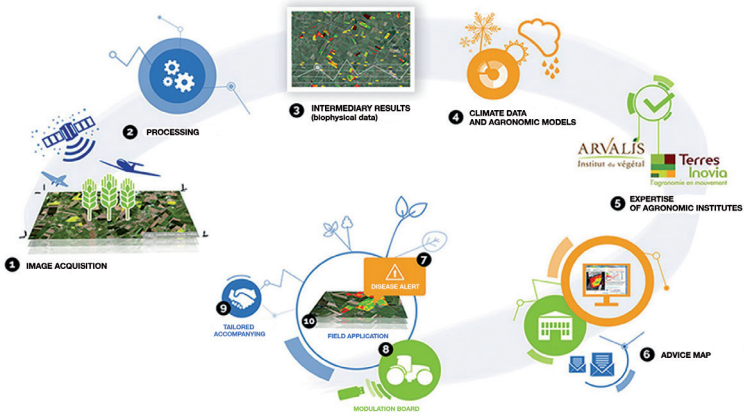


Figura 1: Farmstar, de las imágenes espaciales de alta resolución a los mapas de asesoramientos.

Por ejemplo...

El equipo-proyecto **VALSE** (Inria, Ecole Centrale de Lille, Université de Lille) estudia los problemas derivados del análisis de sistemas dinámicos distribuidos, inciertos e interconectados. Su objetivo es diseñar algoritmos de estimación y control para diferentes campos. En particular, en el ámbito de la ostricultura, estos algoritmos han permitido diseñar un biosensor basado en la medición e interpretación del comportamiento de los moluscos bivalvos, para la detección a distancia de la contaminación de las aguas costeras y las consecuencias del cambio climático.

Entornos estructurados: aliados de los robots

El auge de la robótica ha estado históricamente arraigado en las aplicaciones industriales, especialmente en la automoción, para la automatización de las cadenas productivas (Bahrin et al., 2016). A partir de esto, es posible diseñar infraestructuras que permitan referenciar y hacer funcionar a los robots en entornos perfectamente conocidos e inalterados, así como controlar las condiciones de interacción (condiciones de iluminación, manejo de objetos conocidos, creación de zonas específicas). Esto ayuda en gran medida al diseño de algoritmos robustos de percepción y control basados en modelos de funcionamiento de los robots que requieren fuertes suposiciones (rodar sin resbalar, reconocimiento de objetos o escenas, localización precisa, etc.). Por consiguiente, las aplicaciones de la robótica en la agricultura se han centrado principalmente en el entorno interior, especialmente para la producción ganadera (Bergerman et al., 2016). En este sentido, el mayor mercado de la robótica en la agricultura se encuentra actualmente en el sector ganadero, con robots de alimentación y ordeño. Estos son capaces de funcionar utilizando una serie de puntos de referencia y se benefician de disposiciones especiales para mantener una alta repetibilidad. Así, pueden realizar tareas exigentes (como ordeñar o alimentar a los animales) y liberar el tiempo del ganadero. Este tipo de desarrollos son cada vez más comunes en las prácticas agrícolas, y hoy en día la mitad de las nuevas instalaciones de las granjas lecheras francesas están equipadas con robots de ordeño (Tse et al., 2018).

En la agricultura, estas infraestructuras son más difíciles de establecer, ya que la estructura de la producción de cultivos es intrínsecamente cambiante y plantea problemas de detección y referenciación. Sin embargo, la automatización de ciertas tareas, en particular la conducción de maquinaria agrícola, se ha beneficiado

enormemente de la llegada del GPS, especialmente de los modelos de precisión centimétrica que ofrecen una referencia absoluta. Así, han surgido numerosos dispositivos destinados a automatizar el funcionamiento de las máquinas bajo la supervisión de un "conductor", compartiendo un cierto número de retos de investigación con los avances en los vehículos sin conductor.

Sin embargo, el uso de sensores GPS por sí solo sigue siendo limitado para la producción de robots totalmente autónomos (es decir, sin supervisión humana a bordo) por varias razones. En primer lugar, la posible pérdida de las señales de los satélites cerca de los edificios, en los invernaderos o cerca de la vegetación alta, obligaría a una intervención manual. En segundo lugar, la agricultura requiere una referencia y una interacción con las plantas y no referencias absolutas, si bien la siembra se lleve a cabo mediante una referencia GPS. Por último, la ausencia de un supervisor a bordo obliga a dotar a las máquinas autónomas de un medio de percepción que garantice su seguridad (evitar obstáculos, gestión de la transitabilidad).

Estudio de un tractor eléctrico robotizado para la agroecología. © INRAE.

Así, varias otras estrategias, incluyendo la visión (Stefas et al., 2019) y la tecnología láser (Tourrette et al., 2017), están sustituyendo o complementando la referenciación absoluta para lograr la navegación autónoma. Esto ya se está utilizando comercialmente en robots, principalmente para desmalezar con máquinas, la siega y la vigilancia. Sin embargo, la eficacia de las tareas de estos robots es

actualmente limitada y su rendimiento está estrechamente relacionado con las condiciones de detectabilidad.

Antes de prever trabajos más complejos (poda, recolección en el campo) realizados de forma totalmente autónoma, hay que superar varios obstáculos científicos y tecnológicos para hacer frente a la variabilidad de los entornos y a la diversidad y complejidad de las tareas que hay que realizar, evitando al mismo tiempo cualquier daño al robot o robots.

De la adaptación a la reconfiguración

A diferencia de la robótica móvil en entornos industriales o en el tráfico rodado, los robots móviles en entornos naturales requieren capacidades adaptativas específicas para hacer frente a la diversidad de condiciones de interacción y a su variabilidad (Bergerman et al., 2016). Esto implica la modificación en línea de los parámetros de percepción y control (como la modificación de los tiempos de respuesta en función de la velocidad (Hill et al., 2020) o la adaptación de los umbrales de detección a las condiciones de luz. Se han propuesto varios mecanismos de adaptación y anticipación o control robusto para hacer frente a la variación de estos entornos y mantener un alto nivel de precisión, protegiendo al mismo tiempo al robot de los daños (Krid et al., 2017, Yandun et al., 2017). Esta última funcionalidad se define de forma relativamente binaria en entornos estructurados: evitar colisiones con obstáculos geométricos, no operar en zonas fuera de los límites, etc. En los entornos naturales, la noción de "obstáculo" está menos definida y las soluciones son más complejas. En primer lugar, encontrarse con un obstáculo no es necesariamente un fracaso, ya que los robots no tienen que detenerse cuando pasan por encima de la vegetación o si tienen que apartar una rama. En segundo lugar, hay zonas que pueden atravesarse bajo determinadas condiciones (limitación de la velocidad o de la carga) y el cruce también depende de las condiciones del suelo (especialmente de la adherencia) y de las propiedades del robot (Guastella, 2018). Por último, la operación en algunas zonas puede provocar una pérdida de control o de estabilidad física del robot (Wolf et al., 2019)

Por ejemplo...

En INRAE, la UR de **TSCF** diseña sistemas de autonomía reconfigurables y compartidos para mejorar el rendimiento y la seguridad de las máquinas que operan en entornos naturales, en particular los que se encuentran en la agricultura. Por ejemplo, el equipo diseña mecanismos de adaptación para hacer frente a la diversidad de condiciones de interacción y su variabilidad.

Varios enfoques permiten tener en cuenta esta complejidad mediante el concepto de transitabilidad (el conjunto de condiciones que permiten atravesar una zona determinada frente al robot). Sin embargo, los trabajos en relación con este concepto ilustran la dificultad de definir un único enfoque de percepción y control que permita a un robot realizar tareas agrícolas complejas. Muchos estudios se centran actualmente en la selección o la fusión en tiempo real de comportamientos típicos (véase el proyecto INRAE A*dap2E* project[43]), , que aborda el problema de la interpretación de la escena y la evaluación del comportamiento.

Además, muchas estrategias en la robótica agrícola se basan en la cooperación entre robots menos complejos, capaces de trabajar juntos o en la misma zona. Esto reduce los riesgos en cuanto al funcionamiento de cada robot (energía cinética limitada en caso de impacto) y su costo, pero traslada la cuestión de la complejidad a la asociación y la sincronización del grupo (Blender et al., 2016).

Conclusión

En este capítulo, hemos examinado los diferentes ámbitos de investigación que abordan el uso de la tecnología digital en la agricultura. Se centran principalmente en los datos en todos los niveles del ciclo de la información, desde la captura hasta la explotación, pasando por la recopilación, trazabilidad, tratamiento, almacenamiento, interpretación, restitución y la utilización de los datos en sistemas automatizados o robotizados. Se utilizan diferentes habilidades y competencias que implican la creación de redes, el modelado, el aprendizaje, la gestión del conocimiento, el control y la seguridad para ofrecer soluciones eficaces, seguras y protegidas. Los objetivos principales son ayudar a los agricultores en las tareas difíciles, permitir una mejor gestión de nuestros recursos y promover los intercambios y el conocimiento experto, todo ello respetando al máximo el medioambiente.

43. https://adap2e.inrae.fr/

4

Tecnología digital y agroecología: oportunidades por explorar, retos por superar

Autores – *Véronique Bellon-Maurel, Pascal Bonnet, Isabelle Piot-Lepetit, Ludovic Brossard, Pierre Labarthe, Pierre Maurel, Jean-Yves Courtonne.*

Agradecimientos (contribuciones, corrección de estilo, edición) – *Frédérick Garcia, Nathalie Mitton, Alexandre Termier.*

La tecnología digital tendrá un impacto significativo en la agricultura. Sin embargo, ¿será este impacto positivo o negativo? Algunos, como Rotz et al., (2019), temen que la tecnología digital conduzca a un aumento de la integración del mercado y de la concentración empresarial; mientras que otros, como Bonny (2017), rebaten este conflicto, siempre que se realicen cambios en cuanto a la gobernanza y que haya una comunicación eficaz con el público en general. Al mismo tiempo, varios autores han planteado la posible convergencia entre la agroecología y la tecnología digital (Bellon Maurel y Huyghe, 2016; Biradar et al., 2019; Caquet et al., 2020; Grieve et al., 2019; Klerkx y Rose, 2020; Wegener et al., 2017). El término "agroecología" se utiliza para referirse tanto a la disciplina científica como a un movimiento o modelo agrícola basado en un conjunto de prácticas alternativas, cuyo objetivo es construir sistemas alimentarios viables y respetuosos con el hombre y el medio ambiente. Como señala Altieri (1989), la agroecología incorpora tanto aspectos técnicos como socioeconómicos a lo largo de toda la cadena de producción (qué se produce, cómo se produce y para quién). La producción agroecológica tiene como objetivo mejorar los sistemas agrícolas mediante el uso de procesos respetuosos con el medio ambiente, centrándose especialmente en la sinergia biológica entre las partes que componen el agroecosistema y en el equilibrio de las "entradas y salidas" (inputs and outputs) del sistema, también conocida como "cierre del ciclo".

Este capítulo se centrará en las oportunidades y desafíos que presenta la tecnología digital para la agroecología en su sentido más amplio, es decir, los sistemas alimentarios sostenibles. Como "tecnología facilitadora", la tecnología digital es capaz de aumentar las capacidades de los agricultores para responder a cuatro grandes retos:

- mejorar la producción, de acuerdo con los principios de la agroecología, creando conocimientos para apoyar la transición agroecológica y adaptándose a los factores exógenos, concretamente al cambio climático;
- mejorar la producción ayudando a los agricultores en la gestión de sus granjas y explotaciones;
- incorporar de una manera óptima a los agricultores dentro del ecosistema agrícola, es decir, los ecosistemas regionales y las cadenas de valor;
- mejorar el intercambio, el aprendizaje y la comprensión al apoyar la transición agroecológica, es decir, compartir datos, información y conocimientos.

También se estudiarán los desafíos específicos a los que se enfrenta el Sur Global.

4.1 Mejorar la producción: crear conocimientos para apoyar la transición hacia la agroecología

Los conocimientos científicos y tecnológicos que apoyarán la transición hacia nuevos sistemas de producción (incluida la agricultura ecológica, la gestión integrada de plagas y la agrosilvicultura) siguen desarrollándose. Sin embargo, para garantizar el despliegue generalizado de los modelos agroecológicos y permitir su ampliación, urge comprender los mecanismos implicados (Altieri et al., 2012) y establecer puntos de referencia (Vanloqueren y Baret, 2009). En la agroecología, todos los niveles de diversidad y regulación biológica –dentro de las especies, entre las especies o funcional (interacción planta-animal, ecología del paisaje, etc.)– pueden desplegarse para que los sistemas sean resilientes (Caquet et al., 2020). La otra cara de la moneda es la abundancia de posibilidades –variedades a elegir, ensamblajes de especies, interacción entre cultivos y ganado– que hace imposible crear conocimiento siguiendo los caminos convencionales. Ante este reto, es necesario desarrollar nuevos modos de construir conocimiento, y la tecnología digital puede contribuir a este paso vital para la transición agroecológica (Leveau et al., 2019) utilizando tres palancas interconectadas: (i) el modelado de los sistemas complejos agroecológicos, que requiere un enfoque holístico; (ii) la recopilación de datos sobre estos nuevos métodos de cultivo y mejoramientocría, principalmente mediante la recopilación participativa de información; (iii) la inferencia de modelos sobre estos nuevos sistemas de producción, basados en datos.

Trampa para insectos conectada. © *Le mas numérique*

Representación de los sistemas complejos en la agroecología

El modelado en la agroecología está en pleno auge, pero sigue siendo un tema complejo[44]. Éste solo puede tener sentido si incorpora las interacciones dentro de la explotación, o incluso a nivel de paisaje (Tixier et al., 2013). Se trata de una tarea delicada. Antle et al. (2017) identificaron una serie de puntos que deben abordarse con el fin de construir modelos de próxima generación para su uso en la agroecología: (i) la mejora del modelado existente con el fin de tener en cuenta la incertidumbre o los eventos extremos; (ii) la transición de los sistemas de cultivo a los sistemas de producción; (iii) el modelado de las rotaciones y los cultivos complejos; (iv) el modelado de los vínculos entre los cultivos y la producción animal; (v) la ampliación o upscaling, desde los campos al paisaje más amplio o general; y (vi) la interoperabilidad. Asimismo, se deben desarrollar "modelos unitarios" para describir cada compartimento del sistema. Además, la mirada hacia el paisaje más amplio o general conduce a la aparición de nuevas fronteras científicas relacionadas con una "mayor comprensión de la dinámica de las poblaciones y el papel de las interfaces entre los entornos de cultivo y los entornos naturales, sobre los que se ha escrito poco" (Caquet et al., 2020). Igualmente, existe una serie de retos relacionados con el modelado dentro de las granjas, debido a que éstas son sistemas complejos que deben gestionarse mediante una combinación de modelos socioecológicos y sociotécnicos (Bergez y Thérond, 2019).

Recopilación de datos a gran escala para nuevos agroecosistemas

La falta de datos y las dificultades para acceder a ellos pueden ser un obstáculo para mejorar y utilizar los modelos. Sin embargo, la cantidad de datos sobre la agricultura ha aumentado de forma espectacular. En el año 2014 se estimaba que se producían alrededor de 190.000 datos al día en una explotación agrícola de Estados Unidos y para el año 2050 podrían producirse más de 4 millones de datos al día (Rotz et al., 2019). Estos datos proceden de objetos conectados (Elijah et al., 2018), de sensores fijos (estaciones meteorológicas, trampas conectadas, distintos tipos de alarmas, etc.), de sensores embebidosincrustados en las máquinas (utilizados para supervisar la máquina o los cultivos), de sensores que llevan los animales (sensores de actividad, bolos para medir la temperatura, rastreadores) o de sensores que llevan los operadores humanos (teléfonos móviles). Dada la variedad y el volumen de los datos agrícolas, hoy en día puede resultar cada vez más apropiado utilizar el término "big data agrícola" (Bellon-Maurel et al., 2018). Efectivamente, los datos son esenciales para crear modelos de mecanismos complejos dentro de la agroecología, que son difíciles de modelar utilizando un enfoque determinista. Para desarrollar dichos modelos, se deben realizar

44. *Caquet et al.,* (2020) identificaron nada menos que 107 modelos en Inra en 2018.

cuantificaciones y observaciones sistemáticas dentro de los sistemas de producción agrícola a diferentes niveles (Biradar et al., 2019). Chowdhary et al. (2019) han analizado la cuestión de la falta de puntos de referencia, el impedimento actual en el fenotipado que frena la agroecología y la agrosilvicultura. Por este motivo, el desarrollo de los conocimientos en estas áreas requerirá un aumento de las capacidades de fenotipado de alto rendimiento en diversos entornos, mediante el despliegue de fenotipado de alto rendimiento en campos (agrícola o ganadero). Esto plantea cuestiones relativas a los dispositivos para el fenotipado. En la actualidad, los investigadores y los agricultores realizan el fenotipado utilizando costosos dispositivos de medición, como buggies u otras plataformas automatizadas en los campos[45]. Varios autores (*Caquet et al.,* 2020*; Grieve et al.,* 2019*; Ingrand,* 2018) han recomendado desarrollar el fenotipado a gran escala o realizar el seguimiento continuo de los cultivos, los animales y las condiciones ambientales. Para ello, se necesitarían dispositivos de medición asequibles y fáciles de usar, ya sea sensores próximos –por ejemplo, los sensores portátiles desarrollados por la unidad CAPTE– o sensores remotos –por ejemplo, los satélites Sentinel 2, que ofrecen una resolución de diez metros con un tiempo de revisita de tres a cinco días (*Biradar et al.,* 2019) – para evaluar las características físicas y fisiológicas de plantas y animales (*Reynolds et al.,* 2019).

Modelado basado en datos: un paso hacia nuevos conocimientos

Las posibilidades que abre la inteligencia artificial para extraer conocimiento de los datos en la agricultura –en particular los "big data" o "smart data"– han sido bien documentadas (Pham et Stack, 2018; Wolfert et al., 2017), pero no se refieren específicamente a la agroecología. Aquellos autores que han estudiado el uso de redes neuronales en la agroecología (Jiménez et al., 2008; Schultz et al., 2000) han señalado varios aspectos clave: (i) el problema de la validación de los modelos obtenidos y la incertidumbre; (ii) la necesidad de organizar los sistemas en subsistemas más simples a los que se aplicarán las redes neuronales y (iii) la importancia de considerar la inferencia, a menudo comparada con una caja negra, como un paso importantepeldaño hacia un modelo más analítico.

45. Véase, por ejemplo, el *Field Scanalyzer* de *Lemnatec,* el *Phenomobile* o cochecito (*buggy*) comercializado por *Hiphen,* el *Fieldscan* de *Phenospex,* etc.

4.2 Mejorar la producción: utilizar tecnología digital para ayudar a los agricultores en la gestión de sus explotaciones agrícolas

Según Caquet et al. (2020), "la capacidad de la tecnología digital y de los equipos agroculturales para apoyar específicamente la agroecología sigue siendo un reto". Uno de los cinco "sectores principales" que se debe abordar se refiere a "la caracterización de los medios, las plantas o la ganadería con vistas a mejorar la gestión y el análisis".[46] Asimismo, se plantea la cuestión del apoyo a la toma de decisiones, una cuestión de lo más apremiante dados los múltiples objetivos en juego en las explotaciones agrícolas. La "ampliación" o scaling up hacia una forma de agroecología profundamente transformadora (rediseño de los sistemas) requerirá nuevas herramientas, donde las tecnologías digitales podrían desempeñar un papel clave cuando se trata de (i) mejorar la gestión a lo largo de la temporada (lo que requiere una agricultura o ganadería de precisión) o a nivel estratégico (incorporando datos económicos); y (ii) mejorar las operaciones agrícolas, con equipos agrícolas diseñados para sistemas agrícolas más complejos que requieren más trabajo.

Adaptación de los principios de la agricultura de precisión a la agroecología: observar y tomar decisiones

Los principios de la ganadería y la agricultura de precisión pueden aplicarse a la agroecología, ya que conducen a intervenciones adaptadas a las necesidades de las plantas y los animales. Se centran en cuatro etapas: observación (medición de los "síntomas"), diagnóstico (identificación del estado de una planta o un animal), recomendación (determinación de las medidas a tomar) y acción. Con la agricultura de precisión es posible "mapear" o cartografiar la diversidad de los cultivos y aplicar diferentes medidas a distintas partes de un predio (Bellon y Huyghe, 2016), por ejemplo, la fertilización nitrogenada (mediante sensores por satélite desde principios de la década de 2000 y ahora con tecnología embebida en tractores; el riego de precisión (Molden, 2007), que se basa en la estimación de la escasez de agua mediante "proxies" o datos indirectos

46. Otros son: "el intercambio de información entre los actores regionales", "los equipos agrícolas para las necesidades específicas de la agroecología", "caracterización de la respuesta de los organismos con fines de fenotipado" y la "trazabilidad de los métodos operativos'".

Despegue de un dron cartográfico en Senegal. © CIRAD.

(la temperatura de la superficie de las hojas, la estimación visual de las características fisiológicas[47]); y la protección de los cultivos, que es el aspecto más complejo dada la amplia naturaleza de los problemas fitosanitarios (malas hierbas, insectos y otras plagas, y enfermedades). La ganadería de precisión implica el seguimiento de las condiciones del entorno (medición de la atmósfera dentro de los edificios o de las condiciones externas) y de los animales. Desde hace una veintena de años, se utilizan sensores en los animales o en su entorno, sobre todo en las granjas lecheras, por ejemplo, identificación y seguimiento mediante RFID y GPS, imágenes (2D, 3D, infrarrojos), acelerómetros, sonidos, dispositivos de medición automatizados (balanzas, contadores de agua, contadores de leche, distribuidores de alimentos, etc.) (Chastant-Maillard y Saint-Dizier, 2016). Se controlan diferentes parámetros, es decir, el crecimiento, producción de leche, ingesta de alimentos, estado fisiológico, comportamiento, reproducción, salud y bienestar (detección de cojeras, problemas digestivos, etc.) (Benjamin y Yik, 2019; Fournel et al., 2017; Halachmi et al., 2019; Knight, 2020; Neethirajan, 2017; Rowe et al., 2019; Veissier et al., 2019; Xin y Liu, 2017).

47. Apex Vigne - https://www.hdigitag.fr/fr/application-mobile-apex-vigne-facilite-le-suivi-de-la-croissance-de- la-vigne/l.

En la actualidad, estas técnicas se dirigen principalmente a la ganadería convencional, pero se están desarrollando soluciones para sistemas alternativos. Entre ellas se encuentran los dispositivos para el seguimiento de los animales y los pastos (Shalloo et al., 2018) con el fin de mejorar la eficiencia de los sistemas de pastoreo extensivo –que de otro modo se verían limitados por la falta de datos– y garantizar a los consumidores una ganadería responsable (*Neethirajan*, 2017).

Existen dos aspectos fundamentales cuando se trata de la gestión de los sistemas agroecológicos:

(1) En lo que respecta a la observación, esto se relaciona con la detección temprana de fallos de funcionamiento. Tanto en el caso de los cultivos (Divya y Santhi, 2019; Johannes et al., 2017) como en el de la ganadería (*Ingrand*, 2018), esto es esencial para las granjas alternativas (agroecología, agricultura ecológica, gestión integrada de plagas) que tratan de ampliarse (scale up) sin tener acceso a la misma gama de medidas curativas que los campos agrícolas convencionales. En terreno, la observación visual requiere mucho tiempo, depende de la experiencia y la disponibilidad del observador (Mul et al., 2016) y a veces es imposible de aplicar si el problema es indetectable. Existen tecnologías comercializadas o aún en fase de investigación: (i) dispositivos ópticos para el seguimiento de plantas y la detección de insectos alados (Brydegaard et al., 2014; Grieve et al., 2019), (ii) cuantificación de esporas mediante el análisis en tiempo real de bioaerosoles o biopartículas, aún no satisfactoria (Sharma Ghimiri, 2019), (iii) trampas de insectos conectadas (López et al, 2012), iv) dispositivos de monitorización de animales (Li et al., 2020; Moura et al., 2008; Tullo et al., 2018; van Hirtum y Berckmans, 2004) y, más recientemente, los llamados dispositivos "portátiles", colocados en los animales (Neethirajan, 2017).

(2) En lo que respecta al apoyo a la toma de decisiones, se refiere a la construcción de modelos para suministrar información que pueda utilizarse en la toma de decisiones. Lepenioti et al. (2020) identificaron tres tipos de procesamiento de datos: (i) Análisis descriptivo, que responde a preguntas como "¿cuál es el valor del parámetro en cuestión? ¿Cómo se comparan los niveles con los de otros productores u otros años? ¿Qué ha ocurrido?", (ii) Análisis predictivo, que responde a preguntas como "¿qué va a pasar?" y "¿por qué?" y (iii) Análisis prescriptivo, que responde a preguntas como "¿cuál es el curso de acción recomendado?" El nivel de complejidad de estos modelos es cada vez mayor, al igual que los problemas relacionados con la interpretabilidad y la incertidumbre. Existen "cuellos de botella" o impedimentos metodológicos relacionados con la forma de construir los modelos: ¿qué síntomas hay que seleccionar para incorporarlos a los modelos?, ¿cómo se expresan los síntomas debidos a la variabilidad natural? y, a la hora de hacer recomendaciones, ¿cuáles son los demás factores intrínsecos de

las plantas o los animales, el medio ambiente, los sistemas de producción o de cría (teniendo en cuenta a otros individuos de su grupo), el equipo utilizado y la estrategia agrícola empleada?

La toma de decisiones para múltiples objetivos en la agroecología

La toma de decisiones estratégicas en relación con la gestión de explotaciones agrícolas es bastante diferente con respecto a la agroecología porque los objetivos de los agricultores tienden a tener múltiples variables (optimización de las tres dimensiones de la sostenibilidad)[48] y ser multi-temporales (a corto y largo plazo). Esto plantea algunas cuestiones en cuanto al modelado, como por ejemplo (i) determinar el óptimo en un sistema multi-nivel y espacio-temporal; (ii) incorporar la estrategia del agricultor en los modelos de optimización (Antle et al., 2017; Groot et al., 2010); y (iii) gestionar la incertidumbre. Adicionalmente, se debe explorar el uso de metodologías de modelado y protocolos de gestión de riesgos alternativos. El objetivo aquí no es buscar un compromiso óptimo, sino mantener el sistema dentro de los posibles resultados deseados.

El codiseño de equipos agrícolas y agroecosistemas innovadores

La tecnología tiene la capacidad de desempeñar un papel clave cuando se trata de efectuar una ampliación (scaling up) dentro de la agroecología, donde el nivel de complejidad técnica es mayor que en la agricultura de monocultivo (Wegener et al., 2017). Los cultivos mixtos (múltiples especies, múltiples variedades) o los cultivos intercalados, podrían implementarse a gran escala mediante operaciones de alta precisión (desde la siembra hasta la cosecha) y la caracterización o la clasificación de los productos mixtos de las cosechas. En la agrosilvicultura, los troncos son un impedimento para la movilidad de la maquinaria tradicional, lo que impide la implementación de ésta (Mattia et al., 2018), pero hay pocas soluciones tecnológicas. Chowdahry et al. (2019) han sugerido el desarrollo de pequeños y económicos "soft robots" con brazos flexibles, que operan en red. En el caso de la ganadería, los robots de ordeño capaces de trasladarse a los pastos podrían contribuir a una vuelta al pastoreo más generalizada (Cloet et al., 2017). Por último, en relación con el bienestar de los agricultores o de los empleados, el objetivo es reducir las tareas que son peligrosas, agotadoras o que consumen mucho tiempo (Vasconez et al., 2019). Lo anterior se refiere al cultivo de hortalizas y a la arboricultura en particular: los robots desmalezadores que se venden para su uso en huertas; los robots desmalezadores baratos y de código abierto para microgranjas (Farmbot, LettuceThink);

48. Los objetivos económico, medioambiental y social.

los robots recolectores –que actualmente son un punto de conflicto para las huertas y en la arboricultura debido a su costo– y, sobre todo, los robots colaborativos o cobóticos ("cobots") (Vasconez et al., 2019).

Así, los robots serían capaces de superar las limitaciones de los nuevos sistemas agrícolas y ganaderos, con una productividad igual a la de las prácticas actuales. El trabajo en colaboración, ya sea entre pequeños robots que operan en enjambres o entre robots y humanos ("cobots") es una posible vía a explorar. Los obstáculos son el costo económico de los robots, en relación con su multifuncionalidad, la organización del trabajo en colaboración (entre robots o con humanos), la percepción ,y agarre y la seguridad (movilidad, interacción con humanos). Para desplegar esta tecnología, también habrá que superar los retos relacionados con su impacto medioambiental (fabricación, uso, fin de vida) y su resiliencia (posibilidad de reparación, adaptabilidad y autonomía). El diseño participativo podría proporcionar un medio para desarrollar con éxito robots para su uso en la agroecología, reduciendo las tensiones entre los enfoques basados en la ecología y aquellos en base a los beneficios de la tecnología (di Salvo et al., 2014). En Dinamarca, la ITU (IT University of Copenhague) ha intentado aliviar estas tensiones considerando a los robots como parte del ecosistema ("agroecología robótica").[49]

Por último, se destaca la cuestión de la división entre las grandes explotaciones agrícolas que probablemente adopten los robots y las granjas más pequeñas y no convencionales que no los implementan o lo hacen muy tarde (Caquet et al., 2020). Podría evitarse este problema combinando un enfoque austero con un enfoque de alta tecnología, similar a los del grupo de investigación "high-low tech" (MIT; [50] *Kadish and Dulic,* 2015) y los enfoques "*makers*" (*Anderson,* 2012).

49. https://real.itu.dk/projects/robotic-agroecology/
50. http://highlowtech.org/

4.3 Mejorar la integración dentro del ecosistema regional o económico agrícola

Fuera de los beneficios potenciales para la producción agrícola, la tecnología digital podría reconfigurar la forma en que los agricultores –en el contexto de la transición agroecológica– interactúan con el ecosistema agrícola, tanto en términos del sector económico (aguas arriba con los servicios agrícolas o aguas abajo a través de las cadenas de valor) como de la gestión del suelo.

La reconfiguración de los servicios agrícolas por la tecnología digital

Asesoramiento – El asesoramiento es muy importante para los sistemas de innovación en la agricultura (Labarthe, 2009). Fomenta la interacción entre las partes interesadas dentro de estos sistemas, como por ejemplo las organizaciones agrarias (incluidas las cooperativas), instituciones de investigación, ONG, organismos públicos, industrias tanto anteriores como posteriores, intermediarios, etc.

La cuestión del impacto de la digitalización en los servicios de asesoramiento agrícola ha sido objeto de investigaciones recientes (Fielke et al., 2020) y existen proyectos destinados a dotar a los asesores agrícolas de las herramientas digitales que necesitan, en base al diseño participativo.[51] La digitalización ha tenido un impacto significativo en la actividad de los asesores, tanto a nivel de los servicios de cara al público o de front office (nuevas interfaces y aplicaciones que vinculan a los asesores con los agricultores) como a nivel de servicios de escritorio o de back office (desarrollo de nuevos servicios mediante el uso generalizado de datos o modelos agronómicos). Sin embargo, junto a la digitalización, también hemos presenciado la aparición de nuevos actores (start-ups, empresas del sector de las tecnologías de la información) capaces de transformar por completo los servicios de asesoramiento técnico y la dinámica de los sistemas de innovación agrícola (Fielke et al., 2019).

Al mismo tiempo, se han introducido una serie de políticas públicas a nivel comunitario, nacional y regional en relación con el asesoramiento agrícola, con el objetivo de contribuir al desarrollo sostenible de la agricultura (Dhiab et al., 2020). Aquí hay dos cuestiones en juego. Por un lado, la digitalización está llamada a transformar la propia naturaleza del asesoramiento agrícola; por otro, el asesoramiento debe apoyar la digitalización de la agricultura en aras del desarrollo sostenible, superando las contradicciones sociales, económicas o medioambientales vinculadas a la tecnología digital, es decir, las posibilidades de desigualdad

51. Véanse, por ejemplo, los proyectos de la UE https://www.h2020fairshare.eu/ or https://www.agrilink2020.eu/

de acceso a la información, de inadecuación de las soluciones digitales, de pérdida de autonomía, de riesgo de desequilibrios de poder o de bloqueo (véase la Sección 5: Riesgos).

Seguros – La protección financiera es esencial cuando se trata de mejorar el nivel de vida dentro de la agricultura, debido a su sensibilidad a las condiciones meteorológicas adversas. Existen distintos sistemas en la práctica, ya sea en la forma de fondos (por ejemplo, "fondos para catástrofes agrícolas") o en la forma de seguros, independientemente de que éstos sean privados. Estos diferentes sistemas proporcionan una compensación por daños que la tecnología digital puede ayudar a identificar. Los seguros son "tradicionales" –basados en reclamaciones por pérdidas (cosechas, producción, etc.)– o, más recientemente, "basados en índices", por los que se indemniza a los clientes en función de índices vinculados a esas pérdidas (De Leeuw et al., 2014), como índices de rendimiento regional, índices climáticos, índices basados en imágenes por satélite (Vroege et al., 2019) e índices compuestos (De Leeuw et al., 2014). La tecnología digital podría ayudar a mejorar los seguros basados en índices mediante sistemas de observación y modelización. En lo que respecta a la elaboración de índices, la información –que tradicionalmente proviene de las autoridades públicas (previsiones meteorológicas, rendimiento estimado espacializado) (De Leeuw et al., 2014; Rao, 2010) y la teledetección (De Leeuw et al., 2014; Vroege et al., 2019)– debe cumplir cuatro principios, lo cual no es tarea trivial. La información debe ser (i) digna de confianza y verificable, (ii) estrechamente correlacionada con los daños, (iii) ser accesible de forma continua y (iv) ser recopilada durante un periodo de tiempo suficientemente largo (Vrieling et al., 2014). En relación con los seguros tradicionales, se utilizan modelos para estimar las contingencias, mientras que en los seguros basados en índices los datos se vinculan a los daños mediante el índice. La correlación imperfecta entre el índice y el daño es el "riesgo de base", que se intenta reducir creando índices compuestos, por ejemplo, combinando datos satelitales, datos climáticos e incluso datos sobre el uso del suelo (De Leeuw et al., 2014; Rao, 2010; Vroege et al., 2019). Los peligros yacen en (i) la creación de índices complejos que los agricultores no pueden interpretar (Vroege et al., 2019), (ii) la incorporación incorrecta de patrones meteorológicos causados por el cambio climático, lo que complica aún más la relación entre los datos meteorológicos y los resultados, y (iii) el uso incorrecto de big data –múltiples fuentes, multirresolución, no estacionario– en el análisis estadístico paramétrico de los modelos actuariales tradicionales (Ghahari et al., 2019).

Remodelar las cadenas de valor para una mayor conectividad del mercado

La tecnología digital abre posibilidades para remodelar tanto el sistema alimentario como las cadenas de valor. En las cadenas globales, puede reducir los costos comerciales, garantizar el cumplimiento de las normas y facilitar el comercio internacional, mientras que en las cadenas más cortas puede aumentar la visibilidad y garantizar la transparencia. De este modo, devuelve el poder a quienes se encuentran en los dos extremos de la cadena de valor: los pequeños agricultores y los consumidores (Jouanjean, 2019).

Plataformas – Las plataformas son fundamentales para los nuevos canales económicos de venta de productos agrícolas, alimentos o servicios (por ejemplo, en la agricultura, cofarming.info, hellotractor.com) (ANRT, 2018). Estas interfaces abiertas funcionan como intermediarios entre los proveedores y clientes, aportando sinergias técnicas y económicas (Tirole, 2016). El hecho de que sean gratuitas y fáciles de usar ayuda a que el mayor número posible de usuarios interactúen con ellas, lo que constituye la principal propuesta de valor para animar a los proveedores a utilizar una determinada plataforma (Leibovici, 2015). El comercio electrónico o e-commerce en el sector agroalimentario concierne a gigantes como Walmart y Amazon, pero también puede encontrarse a nivel local, con un nuevo modelo de desarrollo rural y agrícola que toma prestado tanto los enfoques modernos (basados en la globalización) como los postmodernos (centrados en la integración regional) (Rieutort, 2009). Muchas autoridades regionales están tratando de construir plataformas destinadas a adaptar la oferta a la demanda y permitir así que las zonas rurales aisladas accedan a segmentos de mercado de alto valor y creen relaciones estables con los consumidores de las zonas urbanas, abasteciendo a los comedores escolares y satisfaciendo las expectativas de los ciudadanos, tanto en el Norte Global como en el Sur Global (IPES-Food, 2016). A través de la tecnología y las plataformas digitales, se espera que el mercado mundial del consumo "colaborativo" crezca de 15 a 335 mil millones de dólares entre 2017 y 2030 (Claquin et al., 2017). Este nivel de desarrollo requerirá una logística a medida, que también podría basarse en la tecnología digital (Messmer, 2013).

Existen dos obstáculos para estos nuevos canales: la visibilidad de la oferta y la logística. Actualmente, la oferta está dispersa en múltiples plataformas, lo que limita el efecto de red (ley de Metcalfe) y, por tanto, el atractivo de las plataformas, que tienen dificultades para identificar un modelo económico. Además, la falta de flexibilidad digital y logística son obstáculos importantes para que los agricultores se unan a estas plataformas. La restauración colectiva exige que los alimentos sean de origen local (ley EGAlim), por ende, ¿cómo se puede garantizar y mantener la seguridad con una oferta fragmentada? Se podría recurrir a la investigación –sobre

todo a la investigación operativa– para planificar esta oferta fragmentada, para la gestión de bases de datos distribuidas (en varias plataformas) y para idear sistemas logísticos compatibles con estos productos frágiles, pero de bajo valor añadido.

Trazabilidad y confianza – La trazabilidad de los alimentos, tanto humanos como animales, es obligatoria entre empresas (Ley General de Alimentos de la UE de 2002) y opcional dentro de las mismas. El seguimiento intraempresarial se ha convertido en algo generalizado en las fábricas gracias a la automatización y los sistemas de información (Fountas et al., 2015), pero su adopción ha sido menos frecuente en la agricultura (Galliano y Orozco, 2011). En Francia, los programas informáticos de seguimiento técnico y económico son utilizados por una media del 7% de los agricultores de las organizaciones colectivas, con una importante variabilidad (entre el 2 y el 35%)[52] Se trata de un mercado en expansión (en EE. UU. se espera que se duplique entre 2016 y 2023, con un crecimiento superior al 14% anual)[53] dada la voluntad de automatizar la captura de datos para evitar errores en la entrada de datpsde introducción y reducir la carga de trabajo de las personas, mediante el uso de códigos ópticos (códigos de barras, códigos QR), códigos electrónicos como RFID (Luvisi, 2016) y el reconocimiento de voz (Bellon-Maurel et al., 2014), etc. El registro de las prácticas dará lugar a la masificación de los datos privados, que podrían valorarse proporcionando a los consumidores una mejor información sobre las condiciones de producción, respondiendo a sus expectativas (Jouanjean, 2019). La aparición de la "hipertransparencia" (Kos y Kloppenburg, 2019) ha transformado la forma de gobernar la cadena de valor, con nuevos roles para los consumidores –que inciden en los distribuidores y procesadores– y para los pequeños agricultores, que son mejor pagados por los compradores dispuestos a pagar un precio más alto por las "propiedades" deseadas, incluyendo un precio justo para los agricultores (Jouanjean, 2019). Esto tiene un doble efecto, ya que ayuda a los consumidores a tomar una decisión informada y, al mismo tiempo, ayuda a los productores a demostrar que han adoptado prácticas y normas mejoradas mediante el etiquetado (Gardner et al., 2019; Kos y Kloppenburg, 2019), lo que justifica la disposición a pagar (Caquet et al., 2020). Del mismo modo, este es un aspecto clave de las iniciativas de certificación de la sostenibilidad (en gran medida voluntarias) (Mol y Oosterveer, 2015), que podrían contribuir a los sistemas de garantía participativos –y así eliminar la necesidad de pagar a terceros por los controles– o ayudar a realizar LCA (Life-Cycle Assessments) o evaluaciones del ciclo de vida "automáticas" (Bellon-Maurel et al., 2014, 2015; Miah et al., 2018).

52. http://agrotic.org/observatoire/2017/11/06/usage-du-numerique-pour-la-gestion-technico-economique-des-exploitations-agricoles/

53. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/farm-management-software-market-217016636.html

En el marco de este impulso a la transparencia, se puede recurrir a la tecnología que ayuda a crear confianza, una cuestión clave (Jouanjean, 2019). La tecnología blockchain es un buen ejemplo de ello. La blockchain es un medio transparente y seguro de almacenar y compartir información que funciona sin ningún organismo de control central[54]: es un sistema distribuido sin autoridad central. Crea una base de datos que registra todos los intercambios anteriores y que es compartida por diferentes usuarios, lo que permite verificar la validez de los datos. Sin embargo, en las cadenas de suministro, la aplicación de las blockchain dista mucho de ser sencilla. El problema es que si bien la blockchain garantiza la validez de la información compartida (su origen, su integridad y su temporalidad), no puede garantizar su veracidad, es decir, la coherencia entre los flujos de datos y los flujos de productos. Este problema se aborda actualmente mediante la consolidación de los datos (creación de índices de confianza en relación con los datos) o la tecnología (RFID[55], que combina RFID/videogrametría en 3D/huellas digitales (Gopalakrishnan y Behdad, 2019). Por último, dado que los productos alimentarios son perecederos, conviene seguirlos a lo largo de la cadena logística, sobre todo si ésta es larga, registrando los datos durante el transporte mediante, por ejemplo, una identificación rápida de los responsables (en casos de defectos), la reasignación anticipada de los productos (en casos de avería), la prevención del desperdicio de alimentos y la detección de la falsificación de los productos durante el tránsito (Jouanjean, 2019).

54. https://blockchainfrance.net/
55. https://www.wwf.org.nz/what_we_do/marine/blockchain_tuna_project/

Más información

¿Fue la hipertransparencia en 2017 impulsada por el lanzamiento de la marca "C'est qui le patron?" (CQLP –que se traduce como "¿Quién es el patrón?")? A través de internet, CQLP trabajó con los consumidores para diseñar una gama de productos éticos (en función del precio pagado a los productores), preguntándoles sobre las especificaciones técnicas y sociales de los productos y su disposición a pagar en este sentido. Otro ejemplo es Yuka, una aplicación que proporciona "información sobre el impacto en la salud" a partir de la base de datos abierta Open Food Facts[56] (670.000 productos reseñados por los consumidores en abril de 2020), ayudando a cambiar los patrones de consumo e influyendo en los procesos de los fabricantes, quienes cambian la formulación de aquellos productos que reciben una puntuación baja[57].

Sin embargo, algunos autores han expresado su preocupación por los riesgos de esta hipertransparencia: solo es parcial y afectará nuestras prioridades (Gardner et al., 2019), podría excluir a los pequeños agricultores (Jouanjean, 2019; Kos y Kloppenburg, 2019) y podría requerir la ayuda de intermediarios privados, aumentando el carácter asimétrico de la información. Por último, no hay garantía de que beneficie a los agricultores. Asimismo, supone que los consumidores estarán dispuestos a pagar por estos atributos (calidad, origen, huella social/ambiental)

Gestionar los recursos a nivel regional

La gobernanza regional puede definirse (Rey-Valette et al., 2011) como "un proceso dinámico de coordinación en materia de asuntos regionales que se lleva a cabo entre actores públicos y privados con múltiples identidades y recursos asimétricos, que trabajan juntos para establecer objetivos e iniciativas mediante la implementación de múltiples esquemas centrados en el aprendizaje colectivo y que contribuyen a la innovación tanto institucional como organizativa a nivel regional".

La agricultura está adquiriendo un papel cada vez más destacado en los proyectos regionales, no solo por su impacto en la ordenación del territorio, sino también por la "reterritorialización" de la producción de alimentos, que ahora se considera una forma de promover la resiliencia regional (IPES-Food, 2016). La transición agroecológica está reforzando la posición de la agricultura dentro de

56. https://fr.openfoodfacts.org/
57. https://www.franceinter.fr/yuka-l-application-qui-force-intermarche-a-revoir-ses-recettes

este diálogo regional debido a que la ecología del paisaje –que es fundamental para el éxito del proyecto agroecológico– requiere un enfoque colectivo a nivel regional. Además, el cierre de los ciclos (del nitrógeno y del carbono), una palanca esencial de la agroecología, puede tener lugar más allá de la granja a nivel regional, empleando una "economía circular de la biomasa". La tecnología digital está abriendo varios tipos de oportunidades en este ámbito.

Dentro de las regiones, se están estableciendo nuevas economías circulares de base biológica o "bioeconomías", por ejemplo, los residuos agrícolas se están convirtiendo en un recurso (Klerkx et al., 2019) gracias a la reciente aparición de plataformas especializadas, mercados de materiales orgánicos (por ejemplo, Organix de Suez) o para el comercio de productos alimenticios con una vida útil corta (la app toogoodtogo). Entender los flujos de materiales que intervienen en cada etapa del proceso productivo (producción, transformación, intercambio, consumo, residuos) está ganando interés cuando se trata de (i) cuestionar el uso de los recursos naturales e identificar cualquier problema con los usos competidores (por ejemplo, biocombustibles de primera generación vs.frente al uso alimentario, alimentopiensos para el ganado vs.frente a alimentos para el consumo humano), (ii) comprender las vulnerabilidades tanto en las fases anteriores como posteriores (por ejemplo, la dependencia sobrede las importaciones) y, por último, (iii) estimar las huellas medioambientales (por ejemplo, el carbono, la energía, el agua, la contaminación química, el uso del suelo, etc.) (Bioteau et al., 2013). Además de estos aspectos puramente cuantitativos, que implican tanto a las ciencias medioambientales como a las ciencias digitales, las ciencias sociales tendrán un papel fundamental en la comprensión del funcionamiento de las redes que controlan los flujos o que se ven afectadas por ellos. Se trata de dos cuestiones en juego: la reintegración de la producción agrícola a nivel regional (integración material y social), al tiempo que se respeten los límites planetarios. Además, la implementación de una economía de base biológica a nivel europeo, nacional y local exigirá una coherencia entre niveles y entre regiones a la hora de aplicar los planes de acción; pero, por el momento, hay pocos indicios de dicha visión multinivel.

La tecnología digital también expandirá los "kits de herramientas", ayudando a los organismos regionales a promover el diálogo tanto dentro de la agricultura como con otras partes interesadas regionales. Esto debería ayudar a la coordinación, participación y educación de las partes interesadas y a la adopción de nuevas prácticas basadas en la tecnología digital. De manera más general, debería servir para el desarrollo y la gestión de los proyectos regionales, garantizando que sus modelos de desarrollo asignen un lugar inclusivo y explícito a la agricultura.

Será necesario seguir investigando en el ámbito de la ciencia y la tecnología digitales para (i) compensar la falta de datos a nivel regional y sobre sistemas de los que se tiene poco conocimiento, (ii) mejorar el modelado y representación temporal y espacial de estos sistemas y la visualización de los resultados de los modelos, (iii) promover la mediación entre las partes interesadas, y (iv) asegurar los sistemas y los canales de información.

4.4 Apoyar la transición: compartir datos, información y conocimientos

Es necesario apoyar a los agricultores y a los sectores en la transición agroecológica, ya que éstaesta supone varios riesgos significativos. Este apoyo debe ser compatible con el enfoque agroecológico, que promueve "el aprendizaje individual y colectivo [como] fuente de innovación" (Meynard, 2017), basándose en: (i) el modelado, combinado con las indicaciones relativas a la incertidumbre para identificar los cuellos de botella, los riesgos y la capacidad de resiliencia; (ii) el aprendizaje colectivo; (iii) la identificación de los riesgos y el apoyo socioeconómico pertinente (Caquet et al., 2020). En este capítulo se presenta la respuesta de las tecnologías digitales cuando se trata de compartir y aprender.

La tecnología digital: una ventaja para compartir el conocimiento

En cuanto a la implementación de los principios de la agroecología, es necesario proteger los conocimientos tradicionales –a menudo propios de las regiones (Altieri et al., 2012)–: esto supondrá reforzar el capital humano a través de la capacitación y de iniciativas participativas que tengan en cuenta las necesidades, expectativas y circunstancias de los pequeños agricultores (Calvet-Mir et al., 2018). Las plataformas de intercambio de conocimientos, con diferentes niveles de mediación, facilitan la recopilación, intercambio y distribución de conocimientos, como por ejemplo, los vídeos sobre prácticas agroecológicas producidos por mediadores vinculados a los agricultores (AccesAgriculture, DigitalGreen[58], *Osea, etc.) (Bentley et al., 2019), conocimientos recogidos de los agricultores (por ejemplo utilizando CONECT-e, que creó bienes comunes digitales sobre variedades tradicionales para evitar la erosión del conocimiento y el acaparamiento por parte de las empresas comerciales) (Calvet-Mir et al., 2018), plataformas de medios sociales sin mediación (YouTube), etc. Wyckhuys et al. (2018) identificaron dos puntos que son importantes para el éxito de la tecnología digital en la adopción de nuevas prácticas: (i) el acceso garantizado a la tecnología digital, superando los obstáculos técnicos, psicológicos y organizativos, y (ii) la*

58. Más de 5.000 vídeos, en 50 idiomas, producidos a lo largo de 10 años con el apoyo de DigitalGreen (www.digitalgreen.org)

utilización del los conocimientos y las prácticas empleadas por los agricultores como base para idear cursos de capacitación basados en la tecnología digital. La tecnología digital también facilita el trabajo conjunto de las partes para crear conocimiento, una estrategia apropiada para la agroecología dada la forma en que "combina diferentes tipos de conocimiento: el conocimiento tradicional, el conocimiento indígena y el conocimiento científico, además del conocimiento de los agricultores" (Milgroom et al., 2016). Según Wyckhuys, et al. (2018), este aprendizaje social es muy adecuado para tratar los problemas agrícolas en la medida en que abre un espacio para diferentes puntos de vista, reconociendo la diversidad y el conocimiento local. Por esta razón, estos autores recomendaron recurrir a experimentos participativos que empleean el uso de dispositivos digitales (tabletas), como lo hicieron las Escuelas de Campo Digitales para Agricultores.

Sin embargo, siguen existiendo obstáculos para los intercambios entre pares y homólogos y el aprendizaje individual, ya sean tecnológicos (identificar la tecnología para capitalizar y promover los intercambios) o sociológicos (identificar qué modos de aprendizaje hay que promover).

Enfoque participativo e innovación abierta

El enfoque participativo es la piedra angular de la innovación abierta, de los laboratorios vivientes y de las iniciativas de innovación abierta en las que los ciudadanos, residentes y usuarios tienen un papel fundamental en los procesos de investigación e innovación. En la agricultura, los laboratorios vivientes pueden apoyarse en iniciativas de investigación en torno a experimentos con sistemas agroecológicos o aplicarse dentro de proyectos regionales de innovación. La innovación abierta es vital para la agroecología. Concebir "vías" (escenarios futuros plausibles) y escenarios de transición (instanciación del modelo según las vías identificadas) (Antle et al., 2017) es la mejor manera de representar los fenómenos que se producen a diferentes niveles (procesos biológicos, gestión de la explotación agrícola, optimización) (Groot et al., 2012). Las herramientas digitales son extremadamente útiles para estos procesos participativos, en la medida en que pueden utilizarse para (i) almacenar la información de los talleres participativos; (ii) mostrar y visualizar los datos (vistas actuales, futuras, dinámicas, etc. de la región); (iii) equipar los procesos participativos (herramientas de modelización y construcción de escenarios, juegos serios, etc.); iv) compartir y difundir conocimientos; v) crear nuevos conocimientos, aprovechando la diversidad de conocimientos, debates e interacciones; y vi) crear vínculos entre los agricultores, entre los agricultores y los investigadores, entre los agricultores y la sociedad en general, etc. (Bergez et al., 2016; Enkel et al., 2020; Leveau et al., 2019). Algunas herramientas, como los objetos límite, facilitan el análisis de los compromisos y

las representaciones multicriterio durante los talleres participativos (Duru et al., 2015). Esto incluye a los modelos de apoyo o complementarioscorrespondientes de cada una de ellas (Barreteau, 2003). Para hacer frente a los problemas que puedan tener los interesados en la comprensión de los modelos y con el fin de estimular la interactividad (Bécu et al., 2008), estos se implementan en forma de juegos serios, lo que se conoce como la "gamificación" (Seaborn y Fels, 2015). En los últimos cinco o seis años han surgido juegos en las plataformas digitales, lo que permite a las personas expresar sus puntos de vista o preferencias, facilitando la co-construcción (Speelman et al., 2014), ayudando a sensibilizar a los interesados (Prada et al., 2014) y estimulando el aprendizaje (proyecto GATES[59], Speelman et al., 2014), entre otras cosas. A esto se añade ahora la realidad aumentada, que podría ayudar a los interesados a visualizar los futuros paisajes diversificados en el momento de diseñar los sistemas de cultivo[60].

At a sociological level, there are a number of obstacles to implementing a participatory approach: willingness on the part of farmers to head into uncharted territory, the capacity for collectively bringing about change, the capacity to gather and represent tacit knowledge, and the capacity to open up sources of information that will support change.

Los agricultores como productores de datos

Aunque la "agricultura multifuncional" siempre ha existido (Renting et al., 2008, 2009), ha surgido una nueva función gracias a las herramientas digitales de recopilación de datos: la producción de datos.

Los agricultores pueden contribuir al capital digital a nivel regional. La información sobre los componentes de este capital –por ejemplo, la biodiversidad, la fertilidad del suelo, etc. –será fundamental a la hora de documentar, evaluar y pagar los servicios ecosistémicos. Dicha información sería útil para los pagos de servicios ecosistémicos (PSE), pero en la actualidad el costo de su recopilación es tal que los PSE se distribuyen de manera uniforme en función de los medios utilizados (OCDE, 2011). Para pasar de un enfoque basado en los recursos a otro basado en los resultados, será necesario caracterizar mejor el medio ambiente e identificar y cuantificar parámetros simples y medibles que representen su funcionamiento (Caquet et al., 2020). Más allá de los PSE, los agricultores contribuirán a la creación de bienes comunes de información, que Antle et al. (2017)

59. https://www.gates-game.eu/en/project/overview
El proyecto H2020 "Applying GAming TEchnologies for training professionals in Smart Farming - GATES" (Acuerdo de subvención número: 732358 - GATES - H2020-ICT-2016-1).

60. Véase la tesis doctoral de #DigitAg " The use of digital technology in agroecology: Designing agroforestry systems using augmented reality" en www.hdigitag.fr

consideran un bien público cuando se trata de inversiones públicas y de la toma de decisiones políticas. Ya existen iniciativas relacionadas con los datos sobre la calidad del suelo (Della Chiesa et al., 2019) y la biodiversidad.[61] *Van der Burg et al. (2019) identificaron la capacidad de la agricultura digital para generar otros servicios en base a los datos generados; es necesario darle prioridad a la investigación para aclarar el papel social que desempeñan las explotaciones agrícolas, estimular la imaginación de las partes interesadas con respecto a los otros posibles objetivos a los que podría aplicarse la agricultura inteligente, y mejorar la forma de entender sus valores relativos.*

Los agricultores también están generando datos junto con –y para– la investigación, con el fin de analizar y comprender los procesos biológicos que subyacen a la prestación de servicios ecosistémicos dentro de los nuevos sistemas agroecológicos. Caquet et al. (2020) abogan por nuevas estrategias que "combinen los experimentos realizados por los investigadores y el despliegue de otras fuentes de datos [...]", incluidos los experimentos en las explotaciones agrícolas y granjas (Cook et al., 2013). Varios autores consideran que este campo presenta una nueva vía de investigación en la agronomía (Reckling et al., 2020) para rediseñar los sistemas de cultivo mediante la comprensión de los procesos (Falconnier et al., 2016), realizar ensayos de variedades en condiciones reales (Schmidt et al., 2018) y demostrar nuevos sistemas de producción (Leclère et al., 2018). La realización de experimentos en las granjas o explotaciones agrícolas se ha visto reforzada por los sistemas de control automático (Piepho et al., 2011) y la agricultura de precisión (Adams y Cook, 1997; Panten et al., 2010), que reducen las incertidumbres relacionadas con el muestreo y la medición manual.

Estas estrategias, empleadas por los agricultores para la recopilación de datos destinados a la investigación o la documentación medioambiental, han encontrado una serie de obstáculos científicos y técnicos (por ejemplo, ¿Qqué variables medir? ¿Dónde? ¿Con qué frecuencia? ¿Qué infraestructura de intercambio de datos y conocimientos debe emplearse?) y obstáculos socioeconómicos (motivación para compartir datos, valor de los datos, cambios en la profesión, gobernanza de los datos, etc.).

61. http://observatoire-agricole-biodiversite.fr/

4.5 Retos específicos para el Sur Global

La mayoría de las organizaciones internacionales (FAO, 2020) y de los fondos de desarrollo (Banco Mundial, 2019) ven la agricultura digital como algo que transformará y mejorará significativamente el sector agrícola, los sistemas alimentarios y el comercio de los países del Sur Global (Lixi y Dahan, 2014). En África, las razones para desarrollar la agricultura digital son las siguientes:

- la tecnología digital ayudará a diversificar la economía de los servicios, con las condiciones adecuadas para la creación de puestos de trabajo, es decir, un buen nivel de formación en TI, investigación aplicada en ciencia de datos y geomática y una población familiarizada con los teléfonos móviles (72% de la población en 2014)[62];
- esto podría repercutir en muchas categorías de agricultura y en hogares agrícolas; al promover la inclusión de las mujeres y los jóvenes (El Hassane Abdellaoui et al., 2015) la agricultura digital contrarrestará el éxodo rural;
- África es una tierra de oportunidades para la agricultura, con vastas extensiones de tierra y el potencial de un sector agroindustrial que proporciona puestos de trabajo en diversos sectores agrícolas (Pesche et al., 2016).

Para entender el proceso de digitalización y su aplicación agrícola en África, es necesario entender el contexto específico de la agricultura en dicho continente:

- Los sistemas de producción son mucho más diversos que en los países templados. Existe una diversidad entre los países africanos y dentro de ellos mismos; una diversidad entre zonas agroclimáticas, que da lugar a importantes contrastes entre agroecosistemas (regiones tropicales y mediterráneas, áridas y húmedas); una gran variedad de contextos en las regiones rurales, las estructuras y los sistemas de tenencia de la tierra; la coexistencia de estructuras socioeconómicas variadas, con una alta prevalencia de familias dedicadas a la agricultura de subsistencia –ya sea comercialmente o en conjunto con otras formas de trabajo (75% de la tierra cultivable en el mundo; Lowder et al., 2016)–, vinculada a una serie de métodos y prácticas y estructuras especializadas para el monocultivo, a menudo con fines de exportación;
- Los sistemas de producción también son más complejos. La alta prevalencia de sistemas multiespecíficos integrados y multifuncionales, como los sistemas agropastorales (en las regiones secas) o los sistemas agroforestales (cacao y café en las regiones húmedas), genera escenarios y marcos organizativos complejos, con múltiples normas y organismos de gobierno para los recursos

62. https://donnees.banquemondiale.org/indicator/IT.NET.USER.ZS?end=2016&start=1960&view=chart

regionales compartidos (pastos para los sistemas pastorales móviles, bosques tropicales), en circunstancias en las que la información regional es muy escasa y, cuando está disponible, rara vez se comparte;
- Los canales de distribución son muy variados (cadenas de distribución cortas y locales, principalmente para la producción de alimentos, con sectores regionales y nacionales para el abastecimiento de las ciudades y sectores internacionales que adquieren productos de pequeños productores) y pueden ser frágiles (falta de infraestructuras, fragmentación de la oferta, dificultades de adaptación a las normas, etc.);
- Al igual que en el Norte, se ha producido un cambio importante en los sistemas alimentarios, acelerado por la aparición de nuevos actores e inversionistas en el abastecimiento, producción y comercialización agrícola –lo que provoca conflictos como consecuencia de la coexistencia de diferentes modelos agrícolas– y por las herramientas digitales, como las plataformas de comercio electrónico y la revolución en los sistemas de apoyo a la toma de decisiones y de información regional (uso de drones para la detección de proxies o datos indirectos, sistemas de información sobre los mercados, planificación de recursos empresariales, etc.); también cabe destacar que la tecnología digital está impulsando la participación de las mujeres y los jóvenes;
- Existe una clara falta de organización en relación con los datos agrarios, por ejemplo, hay una ausencia de métricas (datos de medición), falta de agrupamiento y archivo de datos, deficiencias de algunos sistemas públicos de información –en cuanto a la propiedad (títulos de inmuebles, inscripciones de la propiedad), los recursos (calidad del suelo, disponibilidad de agua), las cantidades de insumos utilizados, las cantidades producidas y el origen (trazabilidad);
- La intermediación, la comunicación y modos o niveles de interacción (intercambio de información) entre los actores del sector agrícola se ven complicados por el bajo nivel de capacitación de los usuarios, el analfabetismo y la cantidad de dialectos diferentes, lo que da pie al desarrollo de soluciones digitales ad hoc (asesoramiento agrícola mediante asistentes de voz que hablan dialectos regionales).

Así, debemos centrarnos en las necesidades de las explotaciones agrícolas "intermediarias" y multifuncionales dedicadas a múltiples actividades, así como a sus ecosistemas de producción, es decir, a los canales logísticos y a la información regional, los que presentan numerosos obstáculos. Por lo tanto, el objetivo será desarrollar una tecnología digital capaz de abordar las siguientes prioridades:

- Promover el desarrollo de "sistemas alimentarios locales y regionales" centrados en modelos de producción alternativos (agroecología, reciclaje de biomasa, etc.)
- Contribuir a la estructuración del capital de información en las regiones en

las que hay una gran carencia de datos, en beneficio de todos (explotaciones individuales, organizaciones intermediarias, instituciones, etc.);
- Facilitar la comunicación con los agricultores, superando problemas como la escasa cobertura de la red, la desigualdad en el acceso a la energía, el analfabetismo, la multiplicidad de lenguas y dialectos, etc.; y
- Mejorar los suministros en los canales de distribución.

Tanto en las explotaciones agrícolas como en la cadena de suministro, los obstáculos científicos y técnicos son, a grandes rasgos, los mismos que los encontrados en el Norte Global, es decir, la necesidad de implementar una tecnología capaz de anticiparse a los riesgos (detección precoz de errores, apoyo a la toma de decisiones a medida, etc.), la gestión colectiva de recursos escasos como el agua o la materia orgánica y acceso a los mercados (información, logística). Sin embargo, todo ello se ve agravado por los retos específicos que presenta el Sur Global: la diversidad de sistemas, la solvencia, la aptitud técnica de los agricultores, el analfabetismo, la falta de infraestructuras de comunicación (redes, centros de datos, etc.) y de distribución de energía. Más allá de estos aspectos técnicos, también deben explorarse las consideraciones políticas, sociales y económicas para anticipar el impacto que tendrá la tecnología digital en las empresas, los hogares agrícolas dedicados a múltiples actividades, los mercados, los sectores locales y las cadenas de valor globales, las empresas y las regiones (Tsan et al., 2019), dado el número de preguntas sin respuesta sobre el uso de la tecnología digital en la agricultura en el Sur Global (Bonnet et al., 2019; Deichmann et al., 2016; Pingali, 2012). Las condiciones para la innovación y la transición hacia la agricultura digital deberán estudiarse tanto a nivel institucional (explorando el contexto político, sociotécnico y socioeconómico necesario para desarrollar la agricultura digital y, de forma más general, la economía digital) como a nivel de proceso (identificando los procesos de innovación que conducirán a aplicaciones con un impacto probado en la agricultura familiar), con preguntas sobre los métodos de investigación empleados en la agricultura digital y los sistemas de innovación que deberán ponerse en marcha.

Conclusión

En este capítulo se ha presentado una visión general de los ámbitos en los que la tecnología digital podría contribuir a la ampliación y el desarrollo de la agricultura, para cumplir los principios de la agroecología en lo que respecta a la producción y la integración en su entorno social y económico (cadenas de valor, regiones, etc.). Esta visión general puso de manifiesto las necesidades tecnológicas y metodológicas en materia de observación, ciencia de los datos, modelización, extracción de conocimientos, almacenamiento e intercambio de datos y equipos agrícolas especializados para asistir al hombre, muy solicitados en la agroecología. Sin embargo, aunque las oportunidades pueden ser muchas, también existen riesgos para el desarrollo de la tecnología digital en la agricultura. Hay que identificarlos y analizarlos (Capítulo 5) para orientar la investigación futura (Capítulo 6), con el objetivo de desarrollar una tecnología digital responsable para sistemas alimentarios sostenibles y compatibles con los límites del planeta.

5

Riesgos

Autores – *Frédérick Garcia, Pierre Labarthe, Emmanuel Prados, Véronique Bellon-Maurel, Grégoire Chambaz.*

Agradecimientos (contribuciones, corrección de estilo, edición) – *Ludovic Brossard, Nathalie Gandon, Aurélie Javelle, Nathalie Mitton, Alexandre Termier.*

La actual revolución digital ha tenido un impacto significativo en el mundo en que vivimos. En el Capítulo 4 se proporcionó un panorama de las oportunidades que abre esta nueva tecnología, que podría contribuir a que la agricultura sea más agroecológica, más sostenible y más productiva. En términos más generales, el potencial disruptivo de la tecnología digital parece no tener límites y la revolución digital podría interpretarse como una revolución de empoderamiento, que supondría un aumento considerable de la capacidad de los actores para transformar de forma eficiente todos los ámbitos de la sociedad, no sólo la agricultura, sino también la sanidad, el transporte, la cultura, y el medio ambiente, entre otros. Observar, predecir, anticipar y controlar los procesos naturales y sociales en juego en la Tierra podría ser factible dentro de poco gracias a la tecnología digital.

El constante desarrollo de la tecnología digital en el sector agrícola ha suscitado una serie de interrogantes en relación con el cumplimiento de las promesas realizadas y la aceptabilidad social de las transformaciones que las acompañan. Esta concientización de los riesgos intrínsecos de la revolución digital no ocurre exclusivamente en la agricultura. Los análisis realizados sobre cuestiones relativas a la democracia, economía, medio ambiente, trabajo, educación, información, etc. han confirmado la magnitud de los cambios que se están generando, haciendo hincapié en la importancia de que la sociedad aborde los retos relacionados con lo digital y considere el hecho de que la tecnología no es neutral (Stiegler, 2015; Boullier, 2019).

A pesar de las múltiples oportunidades que ofrece, consideramos que el desarrollo de la tecnología digital en la agricultura conlleva una serie de riesgos: no cumplir con las expectativas de que la agricultura y los sistemas alimentarios deben ser más respetuosos con el medio ambiente; agravar el impacto negativo de la tecnología digital en la sociedad en relación con la pérdida de autonomía y aumento de la desigualdad; sufrir la pérdida de soberanía digital y alimentaria; y agravar la vulnerabilidad y debilitar la gobernanza de un sistema alimentario demasiado complejo, intensificar la vulnerabilidad, debilitar la gobernanza y reducir los rendimientos de un sistema alimentario demasiado complejo.

La exploración de estos riesgos dará a los ciudadanos, agricultores e investigadores la oportunidad de reflexionar sobre sus prácticas, sus elecciones y sus prioridades, orientándoles y ayudando a que la tecnología digital sea más responsable para minimizar estos riesgos. En este capítulo se presenta una visión general de los mismos.

5.1 Comprometiendo la transición ecológica en la agricultura

Existe una serie de factores que podrían afectar a la capacidad de la tecnología digital para contribuir a la transición ecológica. Algunos consideran que la tecnología digital es un "obstáculo" en sí misma, en el sentido de que ésta se despliega en un intento por tratar los síntomas en lugar de corregir las causas de los problemas y peligros a los que nos enfrentamos, bajo el argumento de que su despliegue generalizado es una táctica de evasión que impide cualquier posibilidad de cambio más sistémico y radical. Asimismo, se considera que el uso de la tecnología digital en la agricultura diluye los lazos que aún unen al hombre con la naturaleza. Por último, aunque se conoce poco y rara vez se tiene en cuenta, lo digital tiene su propia huella medioambiental, lo que podría poner en duda cualquier beneficio medioambiental.

La transición agroecológica y el bloqueo tecnológico (lock-in)

El bloqueo tecnológico o sociotécnico, un concepto derivado de las teorías de la innovación (David, 1985; Arthur, 1994), se refiere a aquellas situaciones en las que una innovación se bloquea como resultado de las estrategias económicas y tecnológicas aplicadas por los diferentes actores –conocidos como el sistema sociotécnico– que confluyen de tal manera que impiden cualquier desestabilización o cambio, incluso si la innovación podría ser profundamente beneficiosa.

Este concepto se plantea a menudo en relación con la transición agroecológica (Meynard, 2018). Su objetivo es orientar los sistemas de producción hacia prácticas en las que se utilizan menos insumos químicos. Esto se hace con respecto a dos características específicas de la agricultura en los países desarrollados: i) la protección de los cultivos, principalmente en lo que se refiere al uso de pesticidas y ii) la creciente especialización de la producción junto con la escasez acelerada de explotaciones que combinan los cultivos con la ganadería. La forma sistémica e integrada en que se estructura la cadena de suministro de alimentos en torno a estos aspectos es un obstáculo para la transición agroecológica, ya que todos los actores económicos, tecnológicos y regionales deben actuar de forma concertada.

Esto plantea la siguiente pregunta: ¿podría el desarrollo de la tecnología digital en la agricultura conllevar también el riesgo de un mayor bloqueo tecnológico, limitando así las posibilidades de éxito de la transición agroecológica, en todas sus formas? La tecnología digital parece ser un excelente motor de integración entre los diferentes actores de la cadena de suministro agrícola, a todos los niveles.

Además, es compatible, en términos generales, con el sistema sociotécnico del modelo agrícola actual, sobre todo en lo que respecta a su asociación con la maquinaria agrícola (tractor-GPS-software de aplicación modulada) o la tecnología satelital, destacando el objetivo de un mayor control sobre el consumo de insumos (Labarthe, 2010). De este modo, la tecnología digital podría reforzar el bloqueo tecnológico de la situación actual, restringiendo aún más la posible aparición de innovaciones alternativas que promuevan prácticas agrícolas radicalmente más respetuosas con el medio ambiente y menos orientadas a la producción, y que podrían acabar ayudando a la evolución del sistema actual. Así, la digitalización puede caracterizarse por una especie de dependencia de la trayectoria[63], que excluye formas alternativas de agricultura (Clap y Ruder, 2020). Por lo tanto, la preocupación no se refiere a que la agricultura digital "no sea respetuosa con el medio ambiente", sino a que la digitalización de la agricultura refuerza el modelo dominante, basado en la producción, cuando en realidad el objetivo es hacer que la agricultura sea más agroecológica.

El alejamiento del ser humano de la naturaleza

La revolución digital y las nuevas tecnologías que ha traído consigo han transformado nuestra percepción del mundo, mediante interfaces diseñadas para ampliar y enriquecer nuestras capacidades físicas y cognitivas.

En la agricultura, esto ha dado lugar a una "agricultura aumentada" mediante el uso de robots y sensores inteligentes, formando una nueva interfaz entre los agricultores y el mundo vivo de sus granjas, animales o plantas. En las ciencias sociales se han investigado las consecuencias de estas nuevas interfaces, sobre todo en la ganadería, explorando si "las máquinas separan a los humanos de la materia" a través de los datos o si los robots son "una fuerza liberadora o restrictiva para los animales y los humanos" (Lagneaux y Servais, 2014). Aunque se ha prestado poca atención al mundo de las plantas, hemos empezado a ver algunas investigaciones sobre el modo en que la tecnología digital está transformando nuestra relación con las plantas (Javelle et al., 2021).

Más allá del riesgo de perder nuestra conexión material con la naturaleza gracias al un aumento de las interfaces digitales, varios autores también han abordado la cuestión de la cosificación del mundo vivo provocada por la agricultura de precisión y las cuestiones éticas que esto plantea (Bos et al., 2018). Esto es particularmente cierto en la ganadería, ya que algunos ven la expansión de la ingeniería y artificialización de la producción agrícola como una muestra de un

63. Un concepto que surge en la ciencia política en la década de los noventa, la dependencia de la trayectoria es un término utilizado para describir la influencia de las decisiones tomadas en el pasado y de las decisiones adoptadas por los organismos políticos en la toma de decisiones del presente.

posible transanimalism[64], orientado a desarrollar animales "aumentados" con el fin no solo de mejorar su bienestar, sino también de impulsar la productividad. ¿Qué impacto tendrá este enfoque reduccionista –que refuerza la percepción de la máquina animal (Meuret et al., 2013)– en las relaciones humanoombre-animal (Larrère y Larrère, 1997) o en la eficienciaeficacia del sistema de producción en su conjunto? ¿Cómo ven los ciudadanos este tipo de agricultura? Todas estas cuestiones han sido exploradas en las humanidades junto con la agronomía.

La contribución a la creciente huella medioambiental de la tecnología digital

La tecnología digital tiene un impacto medioambiental que se ha tenido poco o nada en cuenta en la agricultura. Al igual que en otros ámbitos de la sociedad, el desarrollo de la tecnología digital en la agricultura implicará un aumento del uso de equipos de captura, transferencia (desplegando redes de sensores inalámbricos, o incluso empleando el uso de 5G), almacenamiento y procesamiento (véanse las plataformas ofrecidas por los fabricantes de tractores), requiriendo componentes y sistemas electrónicos cada vez más potentes e intensivos en energía, con todas las consecuencias medioambientales[65] que ello conlleva (agotamiento de recursos, cambio climático, etc. (Marquet et al., 2019)).

Más información

La cadena de suministro agrícola es actualmente responsable del 13% del consumo total de energía en Francia (sobre todo para el mantenimiento de la cadena de frío); en todos los sectores, lo digital es responsable del 12% del consumo de electricidad y del 3% del consumo total de energía, siendo la mayor contribución la del streaming de vídeo. Aunque no parece haber nada especialmente alarmante en las estadísticas actuales de la agricultura, habrá que prestar atención a la creciente contribución de la agricultura digital.

El aumento del número de diferentes tipos de sensores conectados dará lugar a una mayor dependencia de recursos como los metales preciosos (plata, oro, paladio) y los elementos de tierras raras (neodimio, praseodimio, galio, germanio, etc.) que se encuentran en estos componentes electrónicos, cuya extracción y separación consume grandes cantidades de energía y agua.

64. Droit Animal Ethique & Sciences (2017). Trans-animalism, augmented animals and cyborg animals: towards the status of "sub-machine"? 93, https://www.fondation-droit-animal.org/documents/revue93.pdf

65. https://www.lemonde.fr/blog/binaire/2019/01/29/impacts-environnementaux-du-numerique-de-quoi-parle-t-on/

La distribución geográfica de los centros de producción también es muy desigual, la mayoría se encuentra actualmente en China (Pitron, 2018). Esto también planteará problemas en la gestión del final de la vida útil de los materiales, con el riesgo, no debidamente controlado, de que se extiendan los residuos tecnológicos, de forma similar a lo que hemos visto con el reprocesamiento de los teléfonos móviles en Francia: sólosolo se recoge el 15% de los terminales de los más de 25 millones de teléfonos que se venden cada año, a pesar de la existencia de un flujo especializado para el reciclaje de los residuos electrónicos (Blandin, 2016).

5.2 La profundización de la desigualdad y del desequilibrio de poder

Uno de los riesgos asociados a la digitalización de la agricultura, señalado por primera vez en los años noventa (Wolf y Buttel, 1996), corresponde a la creciente industrialización de la agricultura, cuyas consecuencias sociales y medioambientales son fuente de controversia. Se argumenta que se producirá una especie de co-evolución entre el despliegue de la tecnología digital y la concentración de la producción en unidades de producción cada vez mayores, impulsada por un deseo de mayor eficiencia y productividad a expensas de otros tipos de agricultura o grupos de trabajadores agrícolas. Se han abordado estos riesgos utilizando estrategias de diferentes disciplinas de las humanidades, principalmente la sociología, la ciencia política y la economía institucional (Klerkx et al., 2019).

Riesgos de exclusión

Existe una serie de riesgos de exclusión asociados a la agricultura digital, relacionados a diferentes debates sobre el tema de la diversidad y la coexistencia de los modelos de producción agrícola.

El primer riesgo se refiere a las explotaciones agrícolas con un impacto económico reducido. La cuestión de la exclusión de las pequeñas granjas no es algo propio de la tecnología digital: se ha demostrado cómo la modernización de la agricultura en Francia ha excluido a las pequeñas explotaciones agrícolas, principalmente a través de las economías de escala propias del desarrollo tecnológico (Deléage, 2013). La digitalización se inscribe en esta trayectoria tecnológica de la agricultura, centrada en el aumento del tamaño de las explotaciones agrícolas. Incluso podría acelerarla, dado que, por su propia naturaleza, algunas tecnologías digitales (como aquellas basadas en imágenes por satélite) requieren explotaciones agrícolas de un tamaño mínimo para que sean rentables. Este riesgo de exclusión puede compararse con la incompatibilidad señalada en el punto 5.1,

entre la tecnología digital y ciertas formas de hacer agricultura más ecológica, que requieren un replanteamiento más extenso de los sistemas de producción.

El segundo riesgo está relacionado con el agravamiento de la precariedad del trabajo agrícola, en un momento en el que crece el porcentaje de asalariados en la agricultura y se desea reducir los costos laborales en aras de una mayor productividad. El desarrollo de la robótica –que podría sustituir a la mano de obra humana o limitar ésta a ciertos puestos más cualificados– podría agravar aún más la precariedad entre ciertos grupos, en particular los pobres de la sociedad o los trabajadores inmigrantes.

El tercer riesgo se refiere a la dificultad de acceso a la tecnología digital y/o a las competencias necesarias para utilizarla, lo que también podría impulsar la exclusión en el sector agrícola. Este debate tiene en parte relación con la brecha digital y el riesgoal riesgo de exclusión de ciertas zonas rurales que carecen de equipamiento digital a nivel de infraestructuras.

La pérdida de autonomía de los agricultores

En el ámbito de la sociología rural se han llevado a cabo investigaciones para evaluar los posibles efectos de la digitalización en la autonomía de decisión de los agricultores y el significado que dan a su trabajo. Esto podría tener importantes repercusiones en el tejido cultural de las zonas rurales y de los agricultores, ya que alterará lo que significa ser agricultor (Burton y Riley, 2018). La digitalización puede provocar un cambio en la agricultura, pasando de una gestión "práctica" y basada en la experiencia a un enfoque basado en los datos. Podría "disciplinar" las rutinas de trabajo de los agricultores, condicionándoloas mediante una nueva forma de "racionalidad algorítmica" (Miles, 2019). En consecuencia, la digitalización no controlada por los agricultores es un tema de debate.[66] También se han planteado preguntas sobre el efecto de la digitalización en la autonomía de los agricultores, incluido el temor de que los agricultores puedan convertirse en "trabajadores de los datos" (Rotz et al., 2019).

Control de los sectores aguas arriba y aguas abajo

Otra interrogante se refiere al desequilibrio entre la agricultura y sus sectores aguas arriba y aguas abajo, que la digitalización podría exacerbar. A menudo se ha descrito la agricultura como un sector dominado por los sectores aguas arriba y aguas abajoanteriores y posteriores, y en particular por los primeros (mecanización,

66. https://www.amisdelaterre.org/communique-presse/nouveau-rapport-agriculture-et-numerique-vers-une-fuite-en-avant/

industria química, semillas/ cereales, etc.) en lo que respecta a la dinámica de la innovación. Varios autores han cuestionado el papel que desempeña la digitalización en la transformación (o el empeoramiento) de la relación de la agricultura con los demás sectores.

En el sector aguas arriba de la agricultura, la tecnología digital podría aumentar la dependencia de los agricultores de ciertos insumos (pesticidas, fertilizantes minerales, etc.) al tiempo que optimiza y limita su uso. Esta paradoja se explica principalmente por el hecho de que la tecnología digital adopta la forma de equipos especializados que incorporan modelos, estandarizan la toma de decisiones e inducen asimetrías de conocimientos. Esto está cambiando la forma de controlar el conocimiento (Bronson y Knezevic, 2016).

En los sectores aguas abajo, las nuevas herramientas para compartir y controlar la información (en particular, la tecnología de blockchain y big data) tienen la capacidad de cambiar o reforzar las posiciones de las diferentes partes interesadas en los ecosistemas de innovación y las cadenas de valor. Los interrogantes se refieren a las consecuencias derivadas del intercambio de valor, la forma de gobernar los sectores, el riesgo de la existencia de distintas formas de subsidiariedad dentro de la agricultura y el control por parte de las empresas agroindustriales situadas aguas abajo de la agricultura.

Una nueva interrogante se refiere al papel que podrían desempeñar los nuevos actores, como las empresas del sector de la tecnología digital, –desde las startups hasta las multinacionales–. Los gigantes digitales, por ejemplo, han realizado importantes inversiones en la agricultura, a veces junto con los fabricantes de equipos. Junto a esta inversión, se ha planteado una serie de cuestiones relativas a la gobernanza de los datos en la agricultura y a la capacidad de las partes interesadas del sector agrícola para controlar los conocimientos integrados en la tecnología digital y captar el valor que produce (Carbonell, 2016).

Por lo tanto, la tecnología digital está asociada a dinámicas intersectoriales, lo que exige la realización de investigaciones multidisciplinarias sobre los cambios institucionales resultantes y el riesgo de un posible bloqueo (Carolan, 2020; Labarthe, 2010).

Acceso a la información y a la capacitaciónla formación: ¿qué papel puede desempeñar el asesoramiento?

Una característica fundamental de la tecnología digital es que no es neutra para los sistemas de innovación y el conocimiento agrícola: tiene la capacidad de transformar completamente la forma en que se construye y se difunde el conocimiento y la información dentro del sector (Busse et al., 2015).

Las investigaciones realizadas recientemente han puesto de manifiesto tanto el potencial de la tecnología digital como la amenaza que supone para determinadas partes interesadas o funciones dentro de los sistemas de innovación. Esto es especialmente cierto en el caso del asesoramiento agrícola, cuyos participantes, métodos, contenidos e incluso legitimidad se ven cuestionados por la tecnología digital (Fielke et al., 2020).

Sin embargo, existe una serie de interrogantes sobre el papel que los asesores u otros intermediarios de los sistemas de innovación pueden desempeñar con la llegada de la tecnología digital: ¿cómo se puede integrar más y más información sin generar un exceso de estrés o presión psicológicao para los agricultores? ¿Quién estará en condiciones de evaluar la eficienciaeficacia, durabilidad e idoneidad de las herramientas digitales? ¿Quién tendrá la capacidad de supervisar el contenido de los conocimientos (modelos agronómicos, pruebas de validez, etc.) que contienen estas herramientas y aplicaciones?

La cuestión del impacto de lo digital en la difusión de la información y el conocimiento dentro del sector agrícola también nos remite a la cuestión de la desigualdad, tal y como se ha tratado en la subsección anterior. Esta desigualdad está vinculada a cuestiones de accesibilidad (financiera, cognitiva, de conectividad) a la tecnología digital. La cuestión del acceso desigual al asesoramiento y la información no es nueva (Mundler et al., 2006); el objetivo será determinar si lo digital ayuda a reducir o agrava esta desigualdad. Esto nos remite a cuestiones como el costo y la infraestructura digital de las regiones rurales, pero va más allá; será necesario formar a las comunidades rurales y agrícolas, en toda su diversidad social, dándoles la oportunidad de adquirir las habilidades necesarias para utilizar esta tecnología de forma eficaz y adecuada.

5.3 Pérdida de soberanía

El informe final de la investigación llevado a cabo por el Senado francés de 2019, titulado "Souveraineté numérique" o "Soberanía digital" (Longuet, 2019) demostró que la cuestión de la soberanía digital nunca ha estado más de actualidad.

El informe ha querido destacar que se trata de un triple problema para Francia, relacionado con "la ética, la seguridad y la libertad económica", en un momento en que nuestras sociedades ven cuestionados sus valores y los seres humanos son "cada vez más colecciones de datos para ser explotados". Aunque la agricultura es un ámbito en el que la cuestión de la soberanía nacional –tanto a nivel individual como colectivo– puede considerarse un hecho evidente (la producción está arraigada por naturaleza en las regiones, existen fuertes lazos culturales con la tierra, los poderes públicos tienen una trayectoria de apoyo y orientación de la producción agrícola, la importancia de la investigación pública en materia de agronomía está reconocida en Francia, la PAC es una piedra angular del proyecto europeo, etc.), el desarrollo de la tecnología digital está planteando nuevos retos relacionados con la soberanía digital (Klerkx et al., 2019).

Pérdida de autonomía en el suministro de alimentos

La creciente digitalización de la cadena de suministro –desde los productores hasta los procesadores, pasando por los distribuidores y los consumidores–, cuyo objetivo principal es adecuar la producción a las necesidades, minimizar los costos logísticos y de procesamiento y maximizar la satisfacción del cliente, podría conducir a una integración cada vez mayor de la agricultura. La soberanía se convierte en un problema cuando se desarrollan los monopolios, como se puede ver con la actual ofensiva del gigante digital Amazon en la industria de la distribución de alimentos[67] Asimismo, cabe destacar el rápido desarrollo y uso de herramientas conectadas en los teléfonos inteligentes para evaluar los alimentos y otros productos de consumo (en términos de impacto ambiental, valor nutricional, etc.), que podría tener un importante impacto a largo plazo en los modos de consum[68] No existe ninguna garantía de control democrático sobre estas nuevas herramientas, lo que conlleva el riesgo de que se desarrolle un monopolio. Por último, el modelo económico de la transición digital se basa en parte en las start-ups, algunas de las cuales pretenden ser compradas por grandes grupos. Esto plantea inevitablemente cuestiones relacionadas con la soberanía nacional en lo que respecta a la tecnología y los servicios digitales desarrollados para la agricultura y los datos que produce (Schneider, 2020).

Confiscación de datos agrícolas

La soberanía digital implica el control de los datos. Ya sea por parte de los grandes fabricantes de equipos agrícolas o de los gigantes digitales, existe el riesgo de que los datos agrícolas sean confiscados gracias a la simple restricción del acceso a los datos o a la apertura de los mismos en formatos que son poco

67. https://siecledigital.fr/2020/08/31/amazon-ouverture-de-son-premier-supermarche-connecte-amazon-fresh/
68. https://www.capital.fr/conso/peut-on-faire-confiance-a-yuka-pour-ses-courses-1319721

prácticos de utilizar. La maquinaria agrícola podría actuar como una especie de caballo de Troya para la recopilación de datos en la agricultura. Esto incluye los robots de ordeño en la ganadería como también los tractores y las máquinas cosechadoras para los cultivos de campo. Estas máquinas agrícolas cuentan con un número cada vez mayor de sensores que recogen datos sobre las tareas realizadas y que luego se comparten con los fabricantes. Los contratos de compraventa regulan su uso de una manera que beneficia a los fabricantes (a menudo se estipula que los agricultores deben compartir todos los datos agrícolas). Esto contribuye a mantener una falta de transparencia a lo largo de la cadena de datos (¿qué contienen los datos, a dónde van y con qué fin?), lo que da lugar a una situación de casi bloqueo (a veces es muy difícil para los agricultores acceder a sus datos y aún más difícil aplicarlos a algún fin en particular) (Carbonnel, 2016). La profesión es consciente de este riesgo, ya que los agricultores franceses se han unido a través de la carta Data Agri[69] presentada por dos sindicatos, la FNSEA y la JA. Su objetivo es mejorar el tratamiento, la transparencia y la seguridad de los datos agrícolas en los contratos. Francia parece estar un tanto más adelantada a nivel europeo en lo que respecta a la reflexión sobre el uso de los datos agrícolas, basándose en el reglamento del RGPD sobre la protección de datos personales.

El compartirLa puesta en común de los datos agrícolas es una prioridad tanto para la profesión agrícola como para la investigación en agronomía, con el objetivo de apoyar el desarrollo del conocimiento agronómico y la tecnología y los servicios digitales en la agricultura. Se trata de una cuestión clave en relación con la soberanía digital. Agdatahub[70], una plataforma de intercambio de datos para el sector agrícola desarrollada por varias organizaciones agrícolas (cámaras de agricultura, institutos técnicos, etc.) y empresas, es un buen ejemplo de cómo se puede construir un sistema de confianza en torno a los datos (las empresas francesas DAWEX y 3DS OUTSCALE fueron seleccionadas para la plataforma Agdatahub).

Pérdida de control sobre los equipos de producción

La soberanía también es un problema cuando se trata del control de los equipos de producción en la agricultura. La digitalización hace que estos equipos sean cada vez más complejos (Bournigal, 2014) y que su mantenimiento sea cada vez más difícil, tanto para los agricultores como para los distribuidores, que sufren una pérdida de autonomía técnica. Lo mismo ocurre con la capacitación: los profesores de los institutos agrícolas tienen dificultades para formar a los futuros usuarios profesionales de los equipos agrícolas en un ámbito altamente tecnificado y en constante evolución (Isaac y Pouyat, 2015).

69. https://www.data-agri.fr/
70. https://agdatahub.eu/

Otro problema relacionado con la soberanía es la ausencia de empresas francesas entre los líderes mundiales de la maquinaria agrícola (AGCO, John Deere, New Holland, Lely, De Laval), aunque Francia cuenta con varias empresas pioneras en materia de robots agrícolas móviles (por ejemplo, Naïo Technologies).

Un reto para la ciberseguridad

En el ámbito de la ciberseguridad, el primer reto se refiere al riesgo de ataques a través de objetos y sensores conectados (Dhar, 2021). Esto implica que el propio objeto conectado se convierta en una fuente de un ataque de tipo de denegación de servicio, o que sea hackeado con fines maliciosos. Este último ejemplo es el más preocupante, sobre todo en el caso de los sistemas agrícolas altamente integrados en los que los agricultores han concedido una importante autonomía a los sistemas de control automático (invernaderos automatizados, robots de ordeño, etc.). El hecho de que estos dispositivos se fabriquen a menudo fuera de Europa y de que no podamos intervenir en el diseño (para garantizar la seguridad por diseño), nos obliga a estar aún más atentos al riesgo de backdoors informáticos o puertas traseras.

Un segundo reto se refiere más ampliamente a la protección contra la recuperación y la piratería (robo, modificación, destrucción) de los datos agrícolas. La elección de las plataformas utilizadas para compartir estos datos tiene claramente un impacto significativo en el nivel de protección posible. Aunque los ejemplos más notables de ciberataques se han dirigido a instituciones de importancia estratégica clave para la sociedad (hospitales, aeropuertos, bancos, etc.), la importancia crucial de nuestros sistemas de producción y consumo de alimentos podría convertirlos en objetivos potenciales en el futuro (Gupta et al., 2020).

5.4 Acentuación de las vulnerabilidades y los rendimientos negativos

Las vulnerabilidades del sistema agroalimentario

Como se describe en el apartado 2.3, la agricultura moderna interactúa con una serie de sectores y actores de diversos tipos y tamaños. Esto da lugar a cadenas muy "largas" de suministro y sistemas de toma de decisiones. Además, la actividad agrícola se ha ampliado a ámbitos cada vez más especializados (Bowler, 1986). Este sistema se centra en un gran número de relaciones asimétricas de dependencia entre estos actores. También se centra en el uso intensivo de la tecnología, de la que los usuarios se vuelven gradualmente dependientes. La digitalización de este

sistema podría aumentar las dependencias[71] entre varios de sus elementos y crear otras nuevas. Esta evolución aumenta el riesgo de que el funcionamiento parcial o interrumpido de un elemento pueda paralizar todo el sistema. Estos cambios aumentan el riesgo de que un error que afecte a un elemento paralice todo el sistema. Estas cuestiones (bloqueos, interdependencia) se pusieron de manifiesto durante la crisis de Covid-19, con la aparición de una serie de puntos de tensión en diferentes partes del sistema agroalimentario[72]. Al perturbar las cadenas de suministro, la crisis de Covid-19 también provocó una escasez de bienes –incluidos el cobre y los microchips– en varios sectores, lo que pone de manifiesto los riesgos asociados a la dependencia de dichos bienes (Bouissou y Albert, 2021). Esta advertencia es tanto más llamativa dado que una serie de crisis previstas para las dos próximas décadas (regionales y sistémicas)[73], sobre todo el pico petrolero (Delannoy et al., 2021), pueden tener un impacto mucho mayor en la sociedad y en el sistema agroalimentario en particular (Servigne, 2014). En un momento en que el aumento de la resiliencia del sistema agroalimentario se ha convertido en algo crítico, su digitalización corre el riesgo de hacerlo más vulnerable.

Complejidad creciente, rendimientos menguantes y riesgos asociados

Como se señaló anteriormente, el sistema agroalimentario se configura en torno a una serie de regiones, sectores y actores cada vez más especializados, de diversos tipos y tamaños. También se encuadra en una serie de mecanismos de regulación y diversas relaciones de dependencia. En la actualidad, puede decirse que la agricultura y sus sectores aguas arriba y aguas abajo forman un sistema sociotécnico complejo en el sentido entendido por Tainter (Allen et al., 1999).

Tainter demostró que las sociedades humanas tienden a volverse más complejas a medida que resuelven los problemas a los que se enfrentan, ya que las soluciones desplegadas requieren la adición de nuevos elementos al sistema y la introducción de nuevas regulaciones (Tainter, 1990; Chambaz, 2019). En última instancia, esta complejidad se "paga" a través de los costos energéticos: cuanto más compleja se vuelve una sociedad, más energía se requiere para sus funciones básicas (Tainter, 2016). Este problema se ve agravado por el hecho de que esta complejidad creciente sigue la ley de los rendimientos menguantes: a partir de un determinado umbral, los beneficios de una sociedad que aumenta su complejidad

71. Véase el apartado 5.1 ("El bloqueo tecnológico y la transición agroecológica") y el apartado 5.2..
72. Esto incluye los riesgos relacionados con la logística y la detención de los flujos migratorios, además de la inestabilidad generada por la introducción de políticas nacionales de "sálvese quien pueda" no colaborativas.
73. La probabilidad y la intensidad de los cuales van a aumentar en las próximas décadas. Véase el capítulo 2.

crecen más lentamente que los costos, hasta que se alcanza una situación crítica en la que estos últimos pueden ser superiores a los beneficios[74] (lo que se conoce como rendimientos negativos), como ocurrió antes del colapso de varias civilizaciones (Tainter, 2009). El reto de la complejidad consiste en mantener los costos globales de la energía por debajo de los beneficios que aporta; de lo contrario, se corre el riesgo de que la trayectoria evolutiva del sistema se descontrole y de que cualquier intento de corregir el sistema sólo consiga hacerlo más volátil, vulnerable e incontrolable.

El sistema agroalimentario es ya un sistema sociotécnico especialmente complejo, cuyos costos globales incluyen costos indirectos (a veces muy alejados) relacionados a externalidades negativas como las cuestiones medioambientales, sanitarias y sociopolíticas, que son invisibles o ignoradas por la gran mayoría de las partes interesadas (véase el apartado 2.1). Nuestra incapacidad para evaluar estos costos globales consolidados (energía, materiales, contaminación) y para comprender plenamente la dinámica mencionada, nos hace correr riesgos importantes cada vez que el sistema se vuelve más complejo.

Por esta razón, será necesario explorar el impacto del desarrollo de la tecnología digital en relación con este riesgo, especialmente en la agricultura. En efecto, como se ha comentado anteriormente, la creciente digitalización de la cadena de suministro agroalimentaria corre el riesgo de hacer más complejo este sistema y de reforzar o ampliar los vínculos y la dependencia. El uso incontrolado de la IA y del big data[75] podría atraparnos aún más en una espiral de complejidad creciente.

74. El fenómeno de los rendimientos menguantes seguidos de rendimientos negativos ha sido extensamente estudiado y documentado, incluso en materia de la agricultura (Brue, 1993), la seguridad (Elhefnawy, 2004), la extracción de hidrocarburos (Tainter y Patzke, 2012) y, en general, en la macroeconomía mundial (Elhefnawy, 2008).

75. Con esta tecnología aumentarán significativamente la cantidad y la complejidad de los servicios y materiales necesarios (generación, circulación, almacenamiento y procesamiento de datos – sensores, plataformas, redes, etc.).

Conclusión

En este capítulo se han abordado una serie de riesgos que el desarrollo de la tecnología digital en la agricultura ha traído consigo. Estos riesgos son de naturaleza diversa y están relacionados con las dimensiones económica, política, social, psicológica y medioambiental, entre otras. Estos riesgos podrían ser intrínsecos al despliegue de esta tecnología y podrían ser inevitables o incontrolables. El modo en que se despliegue y utilice esta tecnología dependerá, obviamente, de la investigación previa, pero también –y sobre todo– del modo en que las partes interesadas (ciudadanos, agricultores, actores de la agroindustria y la industria alimentaria, políticos) se comprometan con ella, así como del funcionamiento general de la sociedad (modelos económicos, regímenes políticos, marcos normativos, ideologías, etc.). Hace tiempo que se sabe lo difícil que es para las sociedades controlar el desarrollo de la tecnología (Ellul, 1977). Será esencial tener en cuenta todos estos factores a la hora de dirigir las futuras investigaciones en este campo, como hemos tratado de hacer al identificar los retos esbozados en el Capítulo 6 para conseguir que lo digital sea responsable, pertinente y compartido.

6

Desafíos para el futuro

Proporcionar herramientas digitales para ayudar a abordar los retos y las brechas de la agricultura

Autores – *Ludovic Brossard, Véronique Bellon-Maurel, Pierre Bisquert, Tassadit Bouadi, Frédérick Garcia, Roland Lenain, Pierre Labarthe, Evelyne Lutton, Pierre Maurel, Nathalie Mitton, Alexandre Termier.*

Agradecimientos (contribuciones, corrección de estilo, edición): – *Lluis Miquel Pla Aragones, Isabelle Piot-Lepetit, Emmanuel Prados, Xavier Reboud.*

En este capítulo se destacan las necesidades y los retos relacionados con el desarrollo de una agricultura digital responsable en aras de promover la agroecología, la diversidad agrícola (incluida la agricultura familiar) y los sistemas alimentarios sostenibles. El objetivo es ir más allá de la situación actual (Capítulo 3) y responder a las oportunidades que presenta la tecnología digital para la transición agroecológica y para equilibrar las cadenas de valor (Capítulo 4), evitando al mismo tiempo los riesgos que se han identificado (Capítulo 5). La atención se centrará en los retos que afronta la investigación tecnológica, al tiempo que se reconocen los desafíos económicos y organizativos asociados, especialmente relevantes para la agricultura.

Sobre la base de nuestro análisis de necesidades para promover la aplicación de la agroecología y equilibrar las cadenas de valor, el presente capítulo se divide en cuatro secciones:

- mejorar la gestión colectiva, incluso a nivel regional;
- mejorar la gestión de las explotaciones agrícolas;
- equilibrar la cadena de valor, tanto en sentido aguas arriba como aguas abajo;
- crear y compartir datos y conocimientos.

6.1 Proporcionar herramientas digitales para la gestión colectiva a nivel regional

Se han identificado tres áreas clave para superar los obstáculos relacionados con el uso de la tecnología digital para la gestión de la tierra (apartado 4.3):

- medición y seguimiento a gran escala;
- visualización de datos;
- dispositivos digitales de participación, mediación y gobernanza.

Seguimiento y medición a nivel regional

El anhelo de hacer que la agricultura sea menos artificial, aprovechando al máximo los activos locales y reutilizando los recursos naturales, vendrá determinada por la capacidad de aprovechar los flujos de materiales, el potencial de la regulación biológica y las funciones más allá de la explotación agrícola (servicios ecosistémicos, ecología de la tierra, etc.). Muchas de las diferentes interacciones sólo pueden entenderse desde un punto de vista sistémico. Esto amplía el alcance de nuestra consideración, tanto en el espacio como en el tiempo. Algunas características sólo pueden apreciarse a nivel regional, como el grado de transitabilidad

y la extensión de un terreno (que dependerá de la intensidad de los cinturones verdes o azules[76] que lo atraviesan); mientras que otras deben considerarse a lo largo del tiempo, como la capacidad de resiliencia y la velocidad de recuperación ante los riesgos climáticos. Por lo tanto, si queremos emplear los principios de la agroecología, debemos cuantificar parámetros que son difíciles de detectar con los métodos tradicionales. Esto exige la necesidad de medir y controlar (realizar un seguimiento), evaluar (modelado) y gestionar los datos a gran escala.

En cuanto a la medición y el seguimiento, se tratará de identificar los datos pertinentes, útiles y actualmente inexistentes para la gestión agrícola colectiva a nivel regional y de desarrollar las herramientas para obtenerlos, con los siguientes retos:

- Medir parámetros nuevos y difíciles de comprender (como la biodiversidad, la calidad del suelo y del agua, etc.) de la forma más frugal y no intrusiva posible.
- Realizar un ajuste de la frecuencia de muestreo (temporal y espacial), un componente esencial de la teoría de la información. Los sistemas recopilan datos de forma regular –con diferentes niveles de granularidad en el tiempo y el espacio (redes de sensores)– o esporádica (a través de crowdsourcing, aplicaciones móviles, vehículos móviles de recogida, robots, drones, etc.). Las redes deben adaptarse a estos tipos de datos, que presentan diferentes patrones de tráfico, para poder transmitirlos dentro del límite de tiempo con la mínima pérdida de datos. Esto es aplicable a todos los niveles y se trata con más detalle en el apartado 6.2.

76. El término "cinturón verde" se utiliza para referirse a los entornos terrestres naturales y seminaturales, mientras que el "cinturón azul" se refiere a los humedales y entornos acuáticos (ríos, afluentes, estanques, turberas, etc.). El término "cinturón verde y azul" se refiere a un conjunto de redes ecológicas que permiten el desplazamiento de las poblaciones de especies. Se trata de corredores de fauna que conectan las reservas donde la biodiversidad es más rica y está mejor representada. Estos corredores pueden ser lineales (setos, a lo largo de senderos, franjas de hierba...) o varios tipos de estructuras paisajísticas (https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/trame-verte-et-bleue/).

- Gestión de datos heterogéneos. Esto se debe a la diversidad de los objetos observados, las técnicas de detección y recopilación (incluido el crowdsourcing), las partes interesadas, los parámetros medidos, los formatos (valor, imágenes, localización, etc.) y las propiedades metrológicas (precisión, frecuencia, etc.). Para hacer frente a esta heterogeneidad, será necesario desarrollar métodos de filtrado y fusión adecuados. A veces será posible realizar la fusión a diferentes niveles y de forma más o menos iterativa, teniendo en cuenta la incertidumbre ligada a cada dato, la variabilidad de esta incertidumbre y las consecuencias que pueda tener en el resto de la cadena de información. Estas cuestiones son aplicables a todo tipo de datos: físicos, biológicos, económicos, sociales, etc. Para elaborar informes coherentes (por ejemplo, sobre los flujos de materiales) y las incertidumbres correspondientes, se emplearán herramientas matemáticas e informáticas de conciliación de datos (que suelen basarse en la optimización restringida) (Courtonne et al., 2015).
- La gobernanza de los datos, un problema que se agrava en relación con los sistemas de datos de múltiples fuentes. Se trata de una cuestión general, que se analizará en el apartado 6.4.

En el Sur Global, estas necesidades son cada vez más acentuadas: como se indica en el apartado 4.5, el capital de información es muy escaso en estos países a nivel regional. Este capital es esencial para las administraciones nacionales (en el caso de la agricultura) y las autoridades locales, las organizaciones de productores, los organismos de investigación, etc. cuando se trata de abrir la innovación, anticipar los riesgos (riesgos climáticos, riesgos sanitarios) y mejorar la organización de las regiones y los sectores. En este contexto, nuestra investigación deberá tener en cuenta las dificultades adicionales derivadas de la brecha digital, el analfabetismo, los múltiples dialectos, etc. Sin embargo, estas dificultades también nos ofrecen pistas que explorar con vistas a repensar nuestros sistemas y métodos y adaptarlos a este contexto.

Visualización

Será necesario revolucionar nuestros métodos de visualización para la gestión de datos a nivel regional. Dadas sus particularidades, el sector agrícola ha planteado cuestiones de investigación sin equivalentes actuales en el ámbito de la visualización, como:

- visualización de datos heterogéneos a múltiples escalas, a veces en grandes cantidades y a veces poco frecuentes, es decir, datos espaciales, datos simbólicos, datos temporales, datos variables, datos incompletos, datos inciertos, datos erróneos, datos semicuantitativos e incluso datos cualitativos en función de las variaciones de la estructura, como la cartografía (GIS), las imágenes (procedentes de satélites, drones), las series temporales, los grafos y las redes;
- visualizar escalas extremas, conectándolas de forma fluida y clara –de corto y largo alcance (temporal, geográfico, etc.)–, y desarrollar herramientas adecuadas y apropiadas para la agregación y las estadísticas;
- revelar nueva información de forma semiautomática mediante la comparación de mapas o series temporales, destacando simetrías, regularidades, tendencias, correlaciones, etc.;
- satisfacer necesidades contradictorias como, por ejemplo, la visualización de datos masivos, pero con aplicaciones móviles (teléfonos móviles, tabletas, etc.), o guiar a los usuarios respetando su autonomía;
- encontrar formas innovadoras de representar objetos, dependencias o modelos complejos, capaces de ser utilizados por personas de diversa procedencia.

Estas cuestiones abren nuevas perspectivas con respecto a ciertos temas básicos –como la visualización de incertidumbres (Boukhelifa y Duke, 2009; Potter et al., 2012) y la visualización progresiva (Fekete et al., 2019) –, en relación con la interfaz entre la visualización y la IA. Cabe señalar que, en lo que respecta a la visualización, no ha habido debates extensos sobre las cuestiones relacionadas con la privacidad y los derechos de uso de los datos cuando se trata de generar confianza (Charvat et al., 2018). Las cuestiones enumeradas anteriormente podrían dar lugar a la realización de investigaciones sobre la visualización y la HCI exclusivamente en relación con el sector agrícola.

Dispositivos digitales de participación, mediación y gobernanza

El enfoque de englobar a múltiples actores es esencial a nivel regional y requiere herramientas de apoyo. El modo de generar conocimientos está cambiando y la investigación multidisciplinaria requiere importantes contribuciones de partes interesadas externas, algo que puede ser más fácil en la era digital (Bergez et al., 2019). En los sectores que operan a nivel regional, es cada vez más frecuente que los intereses individuales y colectivos entren en conflicto (Ryschawy et al., 2019). Se prevén nuevos dispositivos digitales de ingeniería regional para facilitar el diálogo dentro del mundo de la agricultura y con otros actores regionales (véase la figura 2).

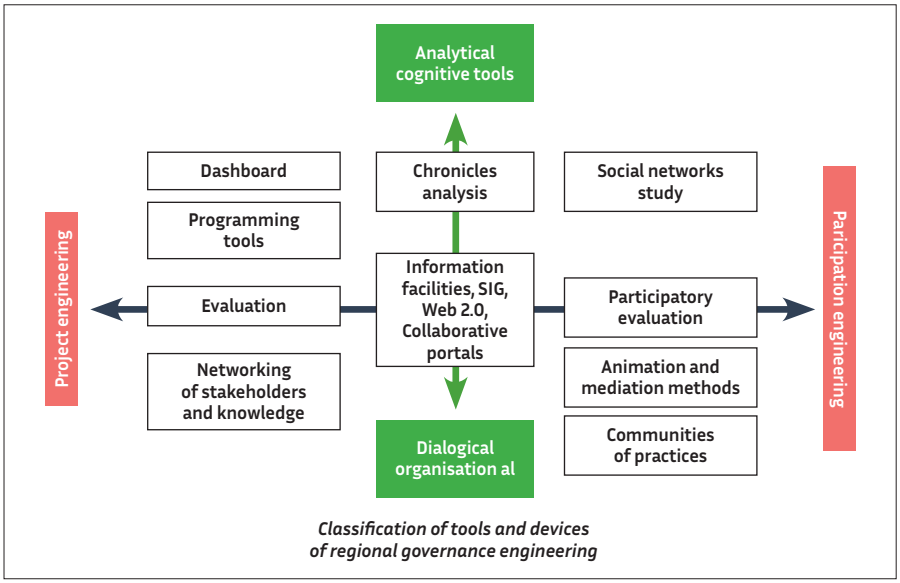


Figura 2: Herramientas y dispositivos para la ingeniería de la gobernanza regional (Rey-Valette et al, 2011)..

Estas herramientas y dispositivos digitales podrían cumplir una serie de funciones: analíticas, creativas, cognitivas, interpersonales, de decisión, operativas, etc. (Rey-Valette et al., 2011). Asimismo, podrían ayudar a desarrollar la acción colectiva facilitando la participación y la innovación abierta, la toma de decisiones colectiva y la mediación.

PARTICIPACIÓN E INNOVACIÓN ABIERTA

La tecnología digital puede proporcionar los medios para aplicar la innovación abierta y la participación. Frente a problemas complejos, es preciso concebir conjuntamente enfoques analíticos (en el laboratorio) y participativos (con partes interesadas de muy diversa procedencia), dentro de lo cual la tecnología digital tiene la capacidad de tender un puente entre ambos (facilitando la negociación mediante el modelado y la visualización).

Para animar a los agricultores a comprometerse con la transición agroecológica, se prefiere un enfoque gradual; será necesaria la capacidad de provocar el cambio de forma colectiva. Se prevé que haya nuevas herramientas digitales disponibles para las estrategias participativas: modelos de apoyo, gamificación digital, herramientas digitales para analizar las sesiones participativas (procesamiento de vídeo y audio para identificar y etiquetar a los participantes y los puntos de vista, etc.).

La innovación abierta también genera necesidades de investigación adicionales, que implican a las ciencias de la gestión, las ciencias sociales y el derecho, es decir, se requieren estudios sobre los tipos de colaboración y las fuentes de información en la innovación abierta asistida por la tecnología digital, sobre los modelos económicos, sobre la gestión del conocimiento tácito, etc. (Enkel et al., 2020). La evaluación de las contribuciones creativas individuales en los procesos de innovación abierta, en los que entrará en juego la protección intelectual, también conocida como "la paradoja de la apertura" (Arora et al., 2016), plantea interrogantes desde el punto de vista del derecho y la economía. Por último, existe el problema en relación con la forma en que se organizan las redes de aprendizaje para facilitar la innovación en la agricultura digital (Klerkx et al., 2019).

TOMA DE DECISIONES COLECTIVA

Este tipo de toma de decisiones se basa en tres procesos diferentes: la deliberación, la negociación y la votación. En lo que respecta a la deliberación (Besnard y Hunter, 2008), al permitir estudiar los argumentos de forma lógica y automática, la tecnología digital podría ayudar a garantizar la racionalidad de las deliberaciones, corrigiendo al mismo tiempo las conclusiones erróneas. En cuanto a la negociación (Kilgour y Eden, 2010), se argumenta que un enfoque más normalizado destinado a alcanzar un compromiso justo conduciría a la participación y la satisfacción de

las partes interesadas y, por lo tanto, a decisiones sostenibles. Por último, en lo que respecta a la propia votación, la tecnología digital podría utilizarse para caracterizar estos principios con el fin de llegar a decisiones pertinentes y deseables, teniendo en cuenta, por ejemplo, las diferentes preferencias expresadas (Brandt et al., 2016).

Las herramientas deben ser fáciles de usar, complementar otros modos de decisión y deliberación colectiva y poder integrarse sin problemas en las rutinas diarias de los individuos (sobre todo cuando se toman decisiones estratégicas) y así recopilar sus argumentos y preferencias. En consecuencia, la visualización de los datos y las decisiones es de vital importancia.

MEDIACIÓN

Lo digital está reconfigurando los objetos fronterizos (Trompette y Vinck, 2009) –a través de los cuales grupos sociales de intereses, prácticas y códigos diversos pueden dialogar y llegar a un entendimiento mutuo– y los objetos intermediarios (Vinck, 1999), que conservan la huella de las diferentes etapas que intervienen en el diseño colectivo de un proyecto o sistema, contribuyendo así a impulsar su aceptación y reutilización. En África y el Sur Global, el uso de bienes comunes como la tierra (agropastoralismo, silvicultura) o el agua (riego) sigue siendo muy generalizado. En este contexto, la tecnología digital también podría emplearse para remodelar los métodos de gestión. Podrían analizarse y reproducirse los experimentos en curso sobre aprendizaje colectivo, laboratorios vivientes y gestión conjunta y participativa en lugares como el oeste y el norte de África.

6.2 Ayudar a los agricultores a gestionar su trayectoria técnica

Se podrían implementar tres palancas para abordar los obstáculos identificados en el apartado 4.2, con vistas a la ampliación de la agroecología:

- sistemas de vigilancia de animales, plantas y su entorno;
- herramientas de apoyo a la decisión; y
- la robótica.

Sistemas de adquisición y diagnóstico

El reto consiste en tener acceso en las explotaciones agrícolas a datos precisos y fiables a bajo costo y con un bajo impacto medioambiental, proporcionando a los agricultores información rápida y fácil de entender sobre el estado de sus sistemas (animales, plantas, cosechas, etc.), permitiendo la detección temprana de

disfunciones y ayudándoles en el proceso de la toma de decisiones. La captación masiva y exhaustiva de datos también podría ayudar a promover el fenotipado a gran escala en las granjas, con el objetivo de desarrollar nuevos conocimientos en el campo de la agroecología. En cuanto a la ganadería, el desafío yace en las limitaciones relacionadas con la medición y la transmisión, las cuestiones éticas y la necesidad reconocida de implementar formas no convencionales de ganadería. En el contexto de la agroecología, una cuestión clave es la detección de fallos, poniendo en juego la "cobertura" (el área cubierta por el sistema de detección) frente a la especificidad. Las mediciones específicas (por ejemplo, detectar un virus o una bacteria) son complejas debido a la necesidad de establecer contacto, su costo, el suministro de energía y el tema de las falsas alarmas en la ganadería (Dominiak y Kristensen, 2017). La investigación debe ser inclusiva, orientada hacia "niveles moderados de instrumentación" y dispositivos accesibles para todos los ganaderos (Bergez et al., 2019; Dumont et al., 2018).

La investigación sobre sistemas de adquisición, sensores e IoT, sistemas de gestión de datos y modelos digitales asociados vinculados a la actividad principal de los agricultores y coherentes con sus estrategias, podría centrarse en:

- **La creación de nuevos sensores respetando las limitaciones propias de la agricultura (frugalidad, costo, uso de energía, etc.).** Habrá que buscar equilibrios entre la autonomía del sensor, su impacto medioambiental, su resolución espacial y temporal sopesada con la especificidad, la calidad de la medición, la durabilidad, la adecuación con respecto al objeto estudiado y la sencillez de uso y el mantenimiento del entorno medido, siendo estos dos últimos factores esenciales para la aceptación de la solución. Con el mismo objetivo de simplificar las interfaces humano-computador, la investigación podría dedicarse al desarrollo de dispositivos de audio que permitan a los agricultores ingresar información (por ejemplo, registros electrónicos de cultivos), es decir, para el reconocimiento de voz, alineación de ontologías, etc. Por último, para mejorar la comprensión de estos sistemas agroecológicos, cada vez está más claro que hay que tener en cuenta no sólo los parámetros físicos de un entorno, sino también sus parámetros biológicos (microbiota animal/suelo), lo que generaría necesidades en términos de métodos ómicos.
- **La optimización de la forma en que los datos se transfieren automáticamente a los centros de procesamiento, así eliminando prácticamente los costos** (*Wolfert et al.*, 2017). Esto es un factor importante para el fenotipado a gran escala en las explotaciones agrícolas y plantea cuestiones de investigación relacionadas con el suministro de energía para los sensores, las redes de sensores (por ejemplo, la inteligencia de enjambre), etc.

- El deseo de limitar el número de sensores (en consonancia con la frugalidad) y de facilitar la medición de determinados parámetros de forma no invasiva exige también la investigación de sensores inteligentes, es decir, combinaciones de datos procedentes de sensores "simples" para estimar estos parámetros complejos mediante un tratamiento de datos adecuado (por ejemplo, aprendizaje automático). El impacto de estos desarrollos en la calidad e incertidumbre de la información está aún por evaluar.

Una vez recopilada, la información puede utilizarse con fines de diagnóstico, para caracterizar el estado de los sistemas agrícolas y detectar cualquier mal funcionamiento que pueda requerir una respuesta. La investigación podría explorar la construcción de modelos de diagnóstico. Aunque esta cuestión no es específica de la agricultura y afecta también a otros sectores, la investigación debe incorporar el conocimiento del ámbito (agricultura) para abordar las siguientes prioridades:

- La selección de los indicadores que se van a integrar, la consideración de la variabilidad natural de los indicadores, la propagación de la incertidumbre de estos indicadores, la sensibilidad y especificidad adaptadas al uso, la adaptación a las condiciones locales (tipo de explotación y ubicación, aceptación del riesgo, prácticas agrícolas, etc.);
- La fusión de big data con datos puntuales de fuentes variadas, procesamiento específico (SVM, deep learning), intercambio de datos (individual o colectivo);
- La hibridación de los enfoques basados en los datos desarrollados en la inteligencia artificial, basados en big data, con los enfoques de modelado que se basan más en los conceptos, pero que son menos adecuados para los datos en tiempo real (Ellis et al., 2020). Esto requerirá la investigación de la explicabilidad de los enfoques basados en datos, además de la investigación de los sistemas basados en el conocimiento (ontologías).

De forma general, cabe esperar que estos desarrollos vinculados a las herramientas de adquisición, comunicación y tratamiento puedan realizarse de forma integrada y escalable para que el sistema en su conjunto sea capaz de adaptarse dinámicamente a cada perfil de cultivo o de ganadería, al tamaño de la granja o a la estrategia agrícola, lo que supone un verdadero reto científico y metodológico.

Los retos de la robotización y la transformación digital de la mano de obra agrícola

Las herramientas digitales están transformando el trabajo agrícola. ¿Cómo pueden orientarse de forma positiva para que el trabajo de los agricultores y empleados agrícolas sea menos arduo y se respete mejor? La robótica podría

ser una forma de desplazar la mano de obra humana hacia tareas de mayor valor añadido, pero aún queda por superar una serie de obstáculos científicos y tecnológicos en los siguientes ámbitos:

PERCEPCIÓN E INTERPRETACIÓN DE ESCENAS EN ENTORNOS DINÁMICOS

Habrá que mejorar la percepción e interpretación de las escenas para aumentar la capacidad de detección (frutos, hojas, enfermedades, etc.). El aprendizaje profundo y, en particular, el aprendizaje automático abrirán vías, sobre todo teniendo en cuenta que los robots estarán equipados con sensores y, por tanto, generarán datos. Una alternativa es utilizar la experiencia humana en materia de percepción, lo que plantea cuestiones en relación con la cooperación entre humanos y robots. Por último, debe ser posible explicar e interpretar decisiones tomadas por los robots y éstos deben ser capaces de remitirse a los expertos, en caso de detección o en la toma de decisiones difíciles. Para ello, habrá que determinar los criterios de confianza para las decisiones y aclarar las reglas de decisión tomadas a partir del aprendizaje, un tema abierto.

ENFOQUES AVANZADOS PARA LA TOMA DE DECISIONES

Actualmente, los robots están limitados a un único modo de funcionamiento. Para las tareas complejas, los cambios entre los modos de mando son secuenciales y se planifican de antemano. Se prevé que se produzcan avances significativos en el ámbito del reconocimiento de la situación y de la escena (la dinámica del robot, su entorno operativo, las limitaciones agroambientales, etc.), tomando prestado de la inteligencia artificial (Hill et al., 2019) con el fin de adaptar las características. Estos problemas trascienden los límites de la navegación autónoma y corresponden también a las herramientas activas para que trabajen con precisión.

DISEÑO DE NUEVAS HERRAMIENTAS ACTIVAS

La innovación en el campo de la robótica agrícola se centra actualmente en la navegación autónoma; las herramientas usadas son pasivas o se controlan de forma independiente (Wu et al., 2019). Para lograr una mayor repetibilidad y mejorar la velocidad de ejecución, se espera que las herramientas activas sean capaces de sincronizarse con los portadores móviles. Para conseguirlo, será necesario investigar sobre la manipulación móvil y la coordinación con un portador móvil.

INTERACCIÓN HOMBRE-MÁQUINA Y AUTONOMÍA COMPARTIDA

Además de las cuestiones relacionadas con la percepción o las interfaces de comunicación, la interacción hombre-máquina también plantea cuestiones sobre la autonomía y la colaboración: ¿cuándo y cómo debe devolverse el control a un operador remoto? ¿Cómo pueden cooperar los robots con los humanos? En la agricultura, la cobótica está empezando a surgir comercialmente, con robots de

asistencia (Laneurit et al., 2016), robots de transporte de personas y, en menor medida, exoesqueletos –en particular exoesqueletos pasivos– destinados a facilitar el levantamiento de cargas pesadas. A raíz de niveles de colaboración más complejos, será necesario interpretar el comportamiento humano para adaptar las acciones de los robots. Este enfoque contribuirá a popularizar los robots, que todavía no sustituirán a los humanos, al igual que debemos garantizar que estos dispositivos funcionen de forma segura.

SEGURIDAD OPERATIVA

Se trata de un aspecto crucial para las máquinas autónomas que operan en entornos abiertos. Habrá que hacer avances científicos, tecnológicos y legislativos, inspirándose en los vehículos sin conductor, pero teniendo en cuenta las dificultades ligadas a los entornos naturales: (i) mantener la precisión en términos de posicionamiento (evitar obstáculos o no aplastar los cultivos), (ii) navegar dentro de un espacio predeterminado, (iii) protegerse contra el riesgo de colisión, o la pérdida de estabilidad o controlabilidad. Serán necesarios una infraestructura y protocolos para validar la seguridad operativa y otros tipos de rendimiento (técnico, medioambiental, etc.).

ADAPTACIÓN A LOS NUEVOS SISTEMAS DE PRODUCCIÓN

Los robots deben diseñarse teniendo en cuenta la frugalidad y la inclusión, es decir, considerando la elección de materiales y componentes (minimizando el uso de elementos de tierras raras), la limitación de las necesidades energéticas, el mantenimiento reducido, la reparabilidad, la escalabilidad de los robots y su capacidad de actualización. Asimismo, la robótica debe aportar soluciones para todo tipo de agricultura, con niveles de sofisticación y autonomía adaptados a los sistemas de producción. Los nuevos sistemas de cultivo, con mezclas de especies y la posible introducción de árboles (agrosilvicultura), plantearán problemas de navegación.

Adicionalmente, existen cuestiones relacionadas con las humanidades en cuanto a la forma en que la tecnología digital y la robótica están transformando el trabajo, sobre la pérdida de autonomía (deskilling) como consecuencia del uso de maquinaria para sustituir a los humanos y la lógica de los profesionales. Para evitar estos riesgos, uno de los retos será incorporar –a partir de la fase de diseño– las condiciones de uso, el impacto en el trabajo y la satisfacción de los agricultores (Hansen y Straete, 2020; Vik et al., 2019) y otras categorías de trabajadores (empleados, asociados, subcontratistas, etc.).

El modelado para incorporar los efectos sistémicos y el desarrollo de herramientas prácticas y utilizables en el apoyo a la toma de decisiones

Los retos de la investigación abarcan una serie de aspectos relacionados con la construcción de modelos y, en particular, la representación y comprensión de las interacciones, la inclusión de los conocimientos de los expertos, el desarrollo de modelos prácticos e integrados para los agricultores y la gestión de la incertidumbre. A continuación se detallan estos aspectos.

LA REPRESENTACIÓN DE ESTOS NUEVOS SISTEMAS SOCIO-AGROECOLÓGICOS

Se trata de un primer reto en la medida en que los sistemas agroecológicos tienen un alcance mucho mayor (incorporan cadenas de valor) y son mucho más complejos (se basan en interacciones) que en el caso de la agricultura convencional. Las dificultades del modelado están relacionadas con la selección de las características y los parámetros que deben incluirse (determinada por la capacidad de medición), la variabilidad natural en cuanto a la forma en que estas características se expresan ante los demás factores intrínsecos de las plantas o los animales, los entornos, los sistemas de producción o de cría (teniendo en cuenta otros individuos de su grupo), el equipo utilizado y la estrategia agrícola empleada.

Los enfoques basados en datos (basados en la estadística, la inteligencia artificial, etc.) podrían combinarse con enfoques basados en conceptos (modelos biológicos, económicos o sociales basados en mecanismos conocidos). Incluso podría considerarse la posibilidad de crear "gemelos digitales", integrando los modelos desarrollados para los subsistemas, con el fin de ensayar escenarios a nivel de sistema (por ejemplo, cambio climático, abastecimiento local a escala masiva, etc.). Sin embargo, esta integración traerá consigo dificultades de alineación[77] cuando no se garantice la correspondencia de conceptos entre los submodelos o entre los gemelos digitales y el sistema estudiado.

EL NIVEL DE INTEGRACIÓN DEL CONOCIMIENTO EXPERTO

Este segundo reto a sobreponerse en el desarrollo de herramientas de apoyo en la toma de decisiones (descripción, predicción, prescripción, véase 4.2) es de interés para las humanidades: ¿será necesario llegar hasta la prescripción, o bastará con la observación (o eventualmente un diagnóstico), dejando la

77. La alineación consiste en indicar que un concepto esbozado en una ontología es semánticamente idéntico a otro concepto esbozado en una ontología diferente, aunque los dos conceptos tengan nombres distintos.

decisión (prescripción) en manos de los ganaderos para la ganadería de precisión, como sugiere Ingrand (2018)? En lo que respecta a la gestión del riesgo, otros formalismos podrían ser accionables, como la teoría de la viabilidad (Aubin, 1991), que en principio es compatible, pero que plantea problemas a los investigadores debido a que los modelos deben proporcionar un marco para sistemas dinámicos pequeños (<10) que están controlados y restringidos (Brias, 2016). Esto da lugar a interrogantes de investigación: ¿qué debe hacerse si el modelo no es dinámico y restringido (modelos compartimentados, sistemas multiagentes), o incluso es desconocido? ¿Cómo se pueden utilizar las señales débiles en las series temporales (puntos de inflexión)? ¿Cómo se puede alcanzar un equilibrio entre la complejidad y el control (Anderies et al., 2019)?, etc.

CREACIÓN DE SISTEMAS PRÁCTICOS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA LOS AGRICULTORES

The issue of practicality is central to the design brief, and there are a number of key points that any future research must take into consideration:

- ***La interfaz del usuario,*** tanto para visualizar los resultados inferidos (que son esenciales para una toma de decisiones eficaz, especialmente en el contexto de la optimización multicriterio (Lepenioti et al., 2020) o en el contexto de los enfoques colectivos (véase el apartado 6.2)), como para recopilar datos e identificar los objetivos estratégicos o las preferencias de los agricultores e incorporarlos a los modelos de decisión. Para ello se podría utilizar la visualización de participación y la gamificación (por ejemplo, el juego digital serio C-Real Game). Podría merecer la pena explorar interfaces hombre-máquina basadas en la comunicación oral para facilitar la introducción y reproducción de datos e información en situaciones en las que los agricultores deben manejar;
- ***La "personalización" de la información inferida,*** es decir, la adaptación de los modelos a cada explotación o agricultor para evitar la uniformización de las prescripciones y para que se ajusten a las estrategias de los agricultores y tengan en cuenta sus objetivos (volumen de negocio, ingresos, modos de explotación, etc.). Los modelos de prescripción actuales derivan de modelos de conocimiento de "amplio espectro" de expertos en la materia; ¿cómo se puede construir de modo que sólo –o principalmente– se utilicen los datos recopilados en las explotaciones agrícolas individuales, con el objetivo de inferir prescripciones más compatibles con las explotaciones y los agricultores? Este obstáculo ha planteado cuestiones relacionadas con la integración de los conocimientos de los agricultores para "personalizar" la información inferida y aumentar su relevancia en relación con su granja, de forma similar a la medicina personalizada;

- ***La capacidad de crear un modelo escalable,*** capaz de adaptarse a entornos susceptibles de cambiar como consecuencia de factores internos (estrategia) y externos (medioambientales, normativos, económicos, etc.). Esto también plantea cuestiones relacionadas con la actualización de los modelos (lo que se conoce como "deriva conceptual"); y
- ***La seguridad de las recomendaciones formuladas,*** es decir, la garantía de que una recomendación no conducirá a un empeoramiento de la situación, especialmente en relación con el control automático. Este problema se debe al apilamiento de modelos y a la propagación de la incertidumbre (Trnka et al., 2007), así como a las características del actuador. Estas últimas deben formar parte del modelo para poder tomar las decisiones pertinentes (véase el índice de oportunidad de Tisseyre y McBratney, 2008).

LA INCERTIDUMBRE Y SU PROPAGACIÓN

La incertidumbre se menciona en el 76% de los artículos sobre modelado (Lepenioti et al., 2020): ¿cómo puede reducirse, cómo puede caracterizarse (epistémica, ontológica, aleatoria) y cómo puede representarse (Caquet et al., 2020; Crespo et al., 2010; Groot et al., 2012)? ¿Cómo puede abordarse la cuestión de los datos incompletos y ruidosos y la naturaleza subjetiva del conocimiento humano, especialmente en el contexto de la prescripción (Lepenioti et al., 2020)? ¿Cómo puede alcanzarse un compromiso entre un modelado excesivamente complejo e inmanejable y uno simplista y no suficientemente relevante (Caquet et al., 2020)? Sin duda, sería útil explorar diferentes formas de simplificar los modelos (modelos estocásticos, modelos mecanicistas-estocásticos, metamodelos, etc.).

En el Sur Global en particular, los sistemas de apoyo a la toma de decisiones deben diseñarse de forma que incorporen las características de la agricultura de estos países; deben ser multifuncionales, con predominio del razonamiento espacio-temporal y con altos niveles de incertidumbre. Los sistemas de ayuda a la toma de decisiones y los sistemas de información asociados deben dar prioridad a: (i) la introducción o la continuación de las prácticas agroecológicas y el aprendizaje colectivo (recogida e intercambio de datos mediante tecnología digital); (ii) la mejora de la gestión de los recursos (agua, materiales orgánicos, etc.), desde las parcelas individuales hasta las regiones enteras, y de las cosechas (fechas, cantidades), (iii) la generación de nuevos conocimientos basados en datos y experiencia en el contexto de los datos raros, pero también de los big data emergentes (véase el apartado 6.5).

6.3 Transformar las relaciones entre las partes interesadas dentro de los sectores

Encontrar un equilibrio entre los sectores para integrar mejor a los agricultores y a los consumidores será fundamental para mantener el atractivo de la agricultura familiar y responder a las expectativas de los consumidores en materia de alimentación. Para afrontar estos retos, se han identificado especialmente tres puntos clave, tanto en los sectores aguas arriba como aguas abajo:

- servicio: asesoramiento, seguros;
- la trazabilidad;
- la "plataformización"[78] y reconfiguración de las redes de distribución.

Servicio: asesoramiento y seguros

En lo que respecta al asesoramiento, cada uno de los obstáculos identificados en el capítulo 4 (el acceso a lo digital, la individualización de la toma de decisiones y el mantenimiento de la autonomía en la toma de decisiones, el desequilibrio entre los sectores aguas arriba y aguas abajo) abren vías de investigación sobre el asesoramiento y la digitalización, tanto en las ciencias digitales como en las humanidades, con tres ámbitos principales de enfoque:

- **El desarrollo de herramientas de apoyo a la toma de decisiones, capaces de integrar las especificidades de cada explotación agrícola (el pedoclima, las técnicas agronómicas empleadas, equipos agrícolas) y las preferencias de los agricultores.** Además de los puntos tratados en el apartado 6.2, el desarrollo de estas herramientas también podría basarse en una comprensión más profunda –en base a los análisis agronómicos, sociológicos, de gestión y ergonómicos– del papel de los asesores y de los vínculos de confianza que establecen con los agricultores en los perfiles de uso de las soluciones digitales;
- **La continuación del análisis económico de los modos de toma de decisiones empleados por los agricultores y la dinámica de adopción de las innovaciones digitales** en un contexto afectado tanto por la diversificación de la forma en que los agricultores buscan información como por la fragmentación de

78. La plataformización es un modelo de negocio en el que las organizaciones emplean el uso de una plataforma web para actuar como intermediario entre los consumidores, a diferencia de un proveedor de bienes y servicios. Para saber más:: https://www.decideo.fr/Entreprise-3-0%C2%A0-vers-une-ineluctable-%C2%A0plateformisation%C2%A0-du-Business-de-l-IT_a9280.html

los servicios como resultado de la privatización del asesoramiento. También se podrían realizar investigaciones para identificar modelos económicos sostenibles para el asesoramiento digital;
- **El análisis institucional de la gobernanza de la digitalización de la agricultura,** taking us back to the issue of transparency regarding the use of data, the regulation of power relationships and advice as a key factor in the digitalisation process.

En lo que respecta a los seguros (apartado 4.2), todavía será necesario realizar avances tecnológicos para reducir el riesgo de base de los seguros basados en índices; lo anterior podría recurrir a nuevas fuentes de datos (satélites, estaciones conectadas, etc.) o a tipos de procesamiento adecuados (De Leeuw et al., 2014; Ghahari et al., 2019). Por último, los seguros basados en el uso –que han surgido en el sector del transporte (Husnjak et al., 2015)– son todavía desconocidos en la agricultura, pero podrían ser una vía útil de exploración en el contexto de la agricultura conectada. ¿Podría este seguro basado en el uso ayudar a la adopción de prácticas agroecológicas –más complejas de implementar dada la necesidad de un mayor seguimiento, pero más resistentes en caso de catástrofe sanitaria o meteorológica– garantizando los ingresos, siempre que se hayan supervisado correctamente los cultivos o los rebaños y se hayan ejercido las recomendaciones de las herramientas de apoyo a la toma de decisiones? Para responder a estas preguntas es necesario adoptar un enfoque multidisciplinario.

Trazabilidad, transparencia total de la cadena de suministro, ciclo de vida de los datos

Como se señaló en el apartado 4.3, en el contexto actual, la trazabilidad de los flujos y productos en la agricultura es fundamental para establecer la confianza entre los agricultores y los consumidores. El interés por la cadena de bloques (blockchain) es cada vez mayor, por ejemplo, para compartir y distribuir detalles sobre toda la vida de un producto, impidiendo al mismo tiempo el fraude. Sin embargo, existe aún una serie de retos que superar en relación con la gestión de los datos a nivel técnico e institucional, sobre todo en lo que respecta a la trazabilidad global de las prácticas y los productos.

LOS RETOS TÉCNICOS DE LA CADENA DE BLOQUES

¿Cómo se pueden adaptar las actuales blockchains o cadenas de bloques, que fueron diseñadas para la información bancaria, a este nuevo tipo de datos relacionados a los flujos de productos que a menudo son perecederos, con el fin de controlarlos y archivarlos eficazmente sin infringir los principios básicos de almacenamiento de datos en una cadena de bloques? ¿Cómo se puede vincular

de forma incuestionable el flujo de información que caracteriza a la trazabilidad en las cadenas de bloques con el flujo de productos? ¿Cómo pueden reducirse y quién debe asumir los costos de los sistemas de identificación, que benefician a todos los integrantes de la cadena? ¿Cómo se pueden proteger los datos en un ecosistema con un número creciente de fuentes de datos[79]? Además, como se señaló en el Capítulo 3, las blockchains públicas consumen mucha energía, ya que, para que sea incuestionable, la validación de la información está abierta a un enorme número de participantes que se encuentran "en competencia virtual entre sí", conocidos como "mineros", lo que da lugar a un sinfín de cálculos paralelos. Se podría dar preferencia a una blockchain privada, que consume menos energía (porque funciona en base a un número restringido de participantes autorizados) y que se adapta mejor para su uso en la agricultura. Sin embargo, esto plantea la cuestión de la gobernanza de las cadenas de bloques.

EL ALMACENAMIENTO DE DATOS DE LA CADENA AGRÍCOLA Y ALIMENTARIA

Se podría decir que estos datos son industriales, por cuanto están relacionados con la producción agrícola, pero también con las industrias aguas arriba y aguas abajo. ¿Deben almacenarse en lugares específicos o de forma distribuida? ¿Cómo se puede garantizar la soberanía de los datos? ¿Deben evitarse ciertos operadores a la luz de la Cloud Act (ley de la nube)[80]?

INTEGRACIÓN DE DATOS

Este es un aspecto importante a la hora de facilitar el análisis posterior. Debido al importante aumento del volumen de datos, la necesidad de verificar su calidad y el valor de la información, los sistemas capaces de permitir el acceso de información relevante y fiable se convertirán en fuentes de valor. Esto supondrá la verificación de los sistemas de información de la empresa -como el ERP (Enterprise Resource Planning) y el CRM (Customer Relationship Management)- y su diálogo con los datos generados por los objetos conectados gestionados a través de la Internet de las Cosas (IoT). También supondrá la evaluación y el reconocimiento del valor creado por cada uno de los componentes de la cadena de producción

79. Libro blanco publicado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos, en el que se exponen los problemas de seguridad que afectan a la Internet de las Cosas (IoT), en octubre de 2018: (https://csrc.nist.gov/CSRC/media/Publications/white-paper/2018/10/17/iot-trust-concerns/draft/documents/iot-trust-concerns-draft.pdf)

80. El Congreso de EE.UU. aprobó la "Clarifying Lawful Overseas Use of Data Act" ("CLOUD Act"162(*)) en marzo de 2018: Su objetivo principal es reafirmar el derecho de las autoridades estadounidenses a exigir que los intermediarios técnicos sujetos a su jurisdicción compartan todos los datos almacenados, incluso aquellos almacenados en el extranjero. Independientemente, también prevé de acuerdos bilaterales específicos y recíprocos con Estados Unidos (https://www.senat.fr/rap/r19-007-1/r19-007-13.html)

y procesamiento de datos, explorando las siguientes cuestiones: ¿qué formas hay de sacar más provecho de los datos en las cadenas de valor, especialmente de cara a los consumidores? ¿Cómo se puede sensibilizar a los consumidores sobre las transiciones virtuosas en la agricultura?

GOBERNANZA DEL BLOCKCHAIN

El reto consiste en diseñar un sistema justo y seguro en el que participen todas las partes interesadas de forma equitativa, sin que ninguna de ellas imponga su visión a las demás ni tome el control del uso de los datos. Esto plantea una serie de preguntas: ¿cómo deben compartirse los datos generados? ¿Qué hay que poner en marcha en términos de gobernanza de los datos? ¿En qué medida la accesibilidad a la información influirá en la mejora de la gobernanza de la cadena de suministro (Gardner et al., 2019) y en los cambios de poder en las cadenas de valor? ¿Qué impacto tendrá la tecnología digital en las relaciones de confianza y en las formas de compartir el valor dentro del sector (Jakku et al., 2019)? ¿Cómo podemos evitar que el valor que se crea sea recogido exclusivamente por los gigantes digitales (ANRT, 2018)? Existe el riesgo de que la tecnología digital exacerbe los desequilibrios de poder existentes (Bronson y Knezevic, 2016; Carolan, 2017, 2018; Wolf y Buttel, 1996).

La "plataformización" y reconfiguración de canales

Las plataformas, nuevos lugares de encuentro virtuales, están contribuyendo a cambiar el modelo económico dentro de la agricultura, facilitando el diálogo y las dinámicas colectivas. La entrada automática de datos en la agricultura, la hiperconectividad, la Internet de las cosas y la automatización producen información en tiempo real para optimizar el funcionamiento de la cadena de valor, ya sea individualmente o en su conjunto. Esta creciente informatización ha provocado un aumento de las capacidades de agilidad por parte de los canales de distribución y transformación. Será necesario introducir una planificación ágil de la producción agrícola y alimentaria para responder a la creciente necesidad de abastecimiento local en las ciudades y a la restauración colectiva. Para promover la agricultura familiar en las ciudades y la restauración colectiva, habrá que sobreponerse a desafíos significativos relacionados con la planificación de la producción, la coordinación entre los distintos niveles de la cadena de suministro y la logística, para garantizar la satisfacción de las expectativas de todos y ser resistentes a las crisis (como la pandemia de Covid-19). Estos tres puntos se analizan a continuación.

En la agricultura, la planificación de la producción es una realidad para los agricultores contratados por las industrias agroalimentarias, especialmente para las verduras congeladas, en conserva o listas para el consumo (Ahumada et al.,

2012; Li et al., 2015). El reto consiste ahora en planificar la producción de productos frescos para garantizar el suministro de la restauración colectiva, incorporando incertidumbres (meteorológicas, sanitarias, sociales, etc.) y teniendo en cuenta la demanda (Balaji Prabhu y Dakshayini, 2020).

Una solución al problema de la coordinación es la creación de "food hubs", modelos comerciales innovadores que agrupan a los pequeños productores para satisfacer la demanda mayorista (Berti y Mulligan, 2016). Los "food hubs" más integrados son organizaciones intermediarias que utilizan Internet para las operaciones comerciales y que agrupan, distribuyen y comercializan productos alimentarios desde el origen (pequeños productores locales y regionales) hasta los clientes (consumidores individuales o mayoristas). Estos centros deben tener acceso a modelos de cadenas de producción y distribución con características realistas, como la información blanda, integración logística, el modelado de riesgos, el entorno normativo y la calidad y seguridad de los productos. El modelado estocástico podría ser útil en este contexto (Ahumada y Villalobos, 2009).

Para construir redes de distribución logística urbana para la producción suburbana con canales comerciales más cortos, será necesario mejorar la gestión de los inventarios y la planificación de la distribución (sobre todo de los productos fríos) para reducir el desperdicio de alimentos y la consiguiente huella de carbono. Se han realizado pocas investigaciones en relación con la planificación aplicada a las cadenas de suministro de alimentos en comparación con la industria. En particular, es evidente la falta de modelos adecuados para planificar las decisiones operativas de la producción, recolección y distribución de productos agrícolas frescos (Ahumada y Villalobos, 2009). Habrá que tener en cuenta la dimensión medioambiental (Melkonyan et al., 2020).

En el Sur Global, los retos relacionados con la mejora del suministro en los canales de distribución locales son aún más difíciles: esto implicará la reducción de las pérdidas post-cosecha mediante un apoyo organizativo y la mejora de la gestión logística (modelado y optimización de los canales, logística de la cadena de frío, etc.). Para los canales más largos, se prevé el desarrollo de sistemas de trazabilidad frugales y seguros para las cadenas nacionales e internacionales.

Por último, existe asimismo la posibilidad de avanzar hacia una producción alimentaria personalizada. Svetlin et al. (2016) han propuesto el codiseño "en línea" e individualizado de productos mediante el análisis lingüístico de las preferencias de los consumidores y su conversión a parámetros de formulación (aplicados a una bebida de naranja). Este tipo de enfoque podría emplearse con artículos alimentarios más complejos producidos en función de la demanda, las

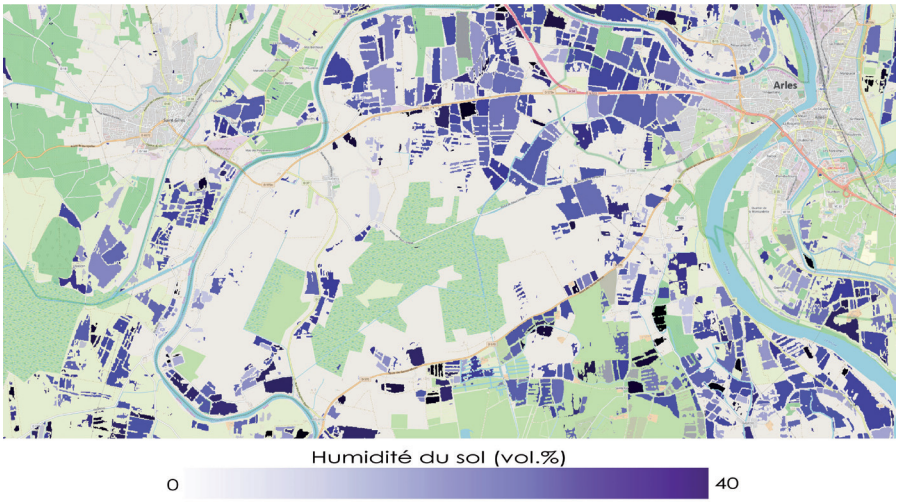
restricciones, los presupuestos y las necesidades individuales, y entregados ya preparados en los hogares de las personas (Académie des technologies, 2021). Esto también facilitaría la conexión con aplicaciones de seguimiento de la salud personalizadas.

6.4 Crear y compartir datos y conocimientos

Los datos y el conocimiento son fundamentales para que la tecnología digital ayude a promover la agroecología: los datos alimentan el conocimiento y el conocimiento alimenta la agroecología. Este capital de información ha traído consigo nuevos retos tecnológicos, normativos, organizativos e institucionales. Estos retos están relacionados con el origen, la calidad (crowdsourcing) y la gobernanza de los datos, pero también con la formalización y el intercambio de conocimientos, retos a los que se habrá de afrontar para construir una agricultura digital ética.

DATOS PARTICIPATIVOS (CROWDSOURCING)

Con la implementación de los sistemas de conectividad y adquisición (smartphones, agricultura de precisión, objetos conectados, etc.), se ha desarrollado la recopilación de datos por parte de operadores (agricultores, asesores, etc.) o legos (ciudadanos), complementando los métodos más convencionales de recogida de datos experimentales por parte de los científicos. La recopilación de datos participativos con fines de documentación o investigación medioambiental presenta retos técnicos (apartado 4.4): ¿qué infraestructura se necesita para gestionar e intercambiar estos datos participativos? ¿Cómo se puede garantizar la calidad de los datos recogidos mediante crowdsourcing? ¿Cómo se pueden rastrear los datos generados en aras de un reparto justo de la propiedad intelectual? Además, se presentan cuestiones que resulten de interés para las áreas de las humanidades y la economía: ¿qué se debe hacer para animar a los agricultores a compartir sus datos e información y a establecer relaciones de confianza con sus entornos de asesoramiento y formación (Sutherland et al., 2013; Wiseman et al., 2019)? ¿Cómo se puede asignar valor a los datos que se producen? ¿Qué impacto tendrá este nuevo papel de recopilador de datos en la evolución del oficio de agricultor?



Cartografía subcelular y semanal de la humedad del suelo por teledetección basada en las imágenes Sentinel 1 y 2. © Theia et INRAE.

LA GOBERNANZA Y EL INTERCAMBIO DE DATOS Y CONOCIMIENTOS

Al hablar de regiones o sectores, hemos demostrado que los datos proceden cada vez más de varios actores (datos de múltiples fuentes). Dado que los datos son generados por distintas partes a través de diferentes sistemas y están posiblemente alojados en múltiples sitios, será necesario determinar cuáles son los derechos de uso de los datos. Así pues, las necesidades pueden ser contradictorias desde el punto de vista de la puesta en común y la protección de los datos (colaborar sin dejar de ser competitivos). ¿Qué modos de gobernanza deben emplearse, en un contexto en el que las empresas digitales y las partes interesadas aguas arriba están invirtiendo mucho en la gestión de datos sobre riesgos agrícolas y en el que los sistemas de innovación agrícola se están digitalizando (Fielke et al., 2019)? Dentro de los circuitos de producción, se debe entender el papel que desempeña la información en el surgimiento de la cooperación y el cumplimiento entre las partes interesadas de diferentes sectores y en distintos niveles de las cadenas de suministro mundiales (Gardner et al., 2019). ¿Cómo se puede promover la circulación "ética y segura" de los datos y la soberanía de los Estados[81]?

81. La Academia Francesa de Tecnología ha recomendado "la introducción de una etiqueta para las soluciones de circulación a nivel europeo que demuestre que son éticas y seguras" y "subraya la importancia de desarrollar soluciones para unir las nubes europeas". Véase https://www.academie-technologies.fr/blog/categories/publications-de-l-academie/posts/pour-une-circulation-vertueuse-des-donnees-numeriques

Evidentemente, estas cuestiones relacionadas con la gobernanza de los datos y el riesgo de que ciertos actores de los sectores (suministros agrícolas, el sector downstream o aguas abajo) o las empresas digitales especializadas en inteligencia artificial y redes se apoderen del poder son aún más graves en el Sur Global, donde hay menos reglamentos vigentes.

FORMALIZACIÓN E INTERCAMBIO DE CONOCIMIENTOS

La tecnología digital puede ayudar a promover la co-construcción (participación) y el intercambio de conocimientos, pero sigue habiendo una serie de desafíos: ¿cómo se puede construir el conocimiento de tal manera que incorpore los usos y el conocimiento de los agricultores (recopilación de experiencia, contextualización, etc.) para aumentar la probabilidad de que sea adoptado? ¿Cómo puede desarrollarse una gobernanza satisfactoria, no sólo en lo que respecta a los datos, sino también al conocimiento generado a través de estos datos? ¿Cómo se puede acelerar la elaboración de los bienes comunes digitales para establecer el conocimiento y, en particular, para compararlo y reunirlo? Esto plantea cuestiones no triviales relativas a la recopilación de conocimientos y ontologías. En particular, ¿cómo hacer compatibles (apilables, asociables) las ontologías construidas a partir de principios diferentes, usos diferentes, autores diferentes, ontologías fundamentales diferentes, etc.? Por último, en aras de la frugalidad y la eficacia, alejándose de la multiplicación de herramientas y aprovechando al máximo los recursos existentes, ¿podría ser beneficioso movilizar sitios y plataformas de medios sociales no especializados para el intercambio de conocimientos? Si es así, ¿cómo se puede conseguir?

En el Sur Global, un primer reto es utilizar la tecnología digital para replantearse los enfoques participativos de aprendizaje colectivo y co-innovación –a través de la interdisciplinariedad "mejorada" (psicología cognitiva, ergonomía, juegos serios inmersivos, pensamiento de diseño y ciencia de la gestión)– y evaluar su impacto (Tesfaye et al., 2019). El objetivo será también facilitar la comunicación con los agricultores y entre ellos, en un contexto de baja cobertura de la red, pluralidad de lenguas y dialectos, etc. (véase el apartado 4.5).

Conclusión

En vista de los riesgos y problemas expuestos anteriormente, los retos identificados en este capítulo deben considerarse dentro de un contexto global general, que permita construir un marco multifacético:

- **La necesidad de una visión sistémica para la agricultura y la tecnología digital.** Los sistemas y sectores de la agricultura son complejos, compuestos

por múltiples elementos y partes interesadas que interactúan entre sí a diferentes niveles (explotaciones agrícolas, regiones, sectores, etc.). Los desarrollos digitales previstos tendrán que ser diseñados y evaluados a la luz de su impacto directo en el nivel en el que se implementan, sino también su impacto indirecto en todo el sistema y en la sociedad en su conjunto, desde una perspectiva biotecnológica, económica, social (por ejemplo, laboral), medioambiental (biodiversidad, recursos, etc.) y ética. La consideración de estos impactos indirectos y el desarrollo de métodos que permitan evaluarlos serán esenciales para tener la capacidad de garantizar que los costos energéticos globales sean inferiores a los beneficios del desarrollo de un determinado tipo de tecnología, por tanto, sin el riesgo de aumentar la complejidad (véase el apartado 5.4). Además, el desarrollo de enfoques sistémicos será esencial para anticipar la retroacción, como el efecto rebote[82] que suele producirse con la tecnología digital. La investigación se enfrenta a importantes dificultades metodológicas y conceptuales, principalmente relacionadas con el análisis sistémico de los problemas. Los enfoques deben ser fundamentalmente transdisciplinarios; algunos marcos, como el concepto de "pensamiento complejo" planteado por Edgar Morin, podrían ser útiles en este caso (Morin, 2014).

- **En busca de la frugalidad.** Se trata de reducir los gastos de energía, el consumo de otros recursos (tanto renovables como no renovables) y la contaminación provocada por el uso de la tecnología. Debe incorporar todas las etapas de la cadena de datos, desde la recopilación y recogida hasta la reproducción y la toma de decisiones. El desarrollo de soluciones digitales debe tener en cuenta los costos, ya sea el valor de los materiales (por ejemplo, los componentes utilizados, el tamaño, el número, especialmente en el caso de los sensores, la robótica, etc.), el de los datos generados (tipo, cantidad, almacenamiento, etc.) o el de la potencia de procesamiento necesaria para ser económico con respecto a los recursos naturales (agua, minerales, etc.) y la energía. Este análisis debe tener en cuenta el ciclo de vida en su totalidad de los materiales utilizados (extracción de recursos, fabricación, transporte, uso, fin de vida). Aunque lo digital exige una reducción del uso de insumos y recursos agrícolas (como el agua, por ejemplo), hay que tener en cuenta su propia huella ambiental al calcular la huella ambiental global de cualquier nueva práctica agrícola. Ello implica también adoptar un enfoque sobrio y prudente a la hora de desarrollar y

82. Una tecnología más eficiente suele provocar un mayor consumo del recurso que se busca conservar como consecuencia de los cambios en el comportamiento de los consumidores; véase https://ecoinfo.cnrs.fr/2015/12/23/les-effets-rebond-du-numerique/

ampliar las soluciones tecnológicas, explorando con anterioridad soluciones y alternativas organizativas y sociopolíticas que no consuman directamente recursos ni emitan contaminación.

- **En busca de la resiliencia.** La optimización de la producción y de los sectores desde el punto de vista de los costos ha conducido las innovaciones tecnológicas durante décadas, lo que ha dado lugar a una especialización, a una reducción de los niveles de existencias, a un menor margen de maniobra y a una menor autonomía por parte de los diferentes actores. Esto ha dado lugar a la reducción de la resiliencia en los sistemas y sectores agrícolas, es decir, su capacidad para resistir y adaptarse –a distintos niveles– a crisis externas como los fenómenos meteorológicos, la escasez de recursos y ruptura de la cadena de suministro y las crisis económicas o sanitarias (Biggs et al., 2015). Las soluciones digitales deben esforzarse por promover esta resiliencia, siendo el componente dentro de un sistema complejo que se basa en los siete principios de resiliencia esbozados por Biggs et al. (2015)[83], evitando la trampa de la complejidad que da lugar a la dependencia técnica o social o a los riesgos de seguridad (de datos, operativos, etc.), siendo estos factores que contribuyen a la fragilidad.

- **Ciberseguridad.** Aunque no es algo exclusivo de la agricultura, sigue siendo un tema indispensable en la misma, dado el impacto que tiene en la soberanía alimentaria. La cuestión se trata, por ende, de mantener tanto la continuidad de la producción y distribución de alimentos y productos agrícolas como la seguridad de la información relacionada con la producción agrícola. La ciberseguridad fue abordada en detalle en un libro blanco anterior (Inria, 2019). La Unión Europea está detrás del proyecto GAIA-X (www.data-infrastructure.eu), cuyo objetivo es desarrollar una infraestructura de datos autónoma y soberana que respete las normas europeas, principalmente a través de una red de computación en la nube. La agricultura es uno de los temas identificados en GAIA-X.

83. https://whatisresilience.org/wp-content/uploads/2016/04/Applying_resilience_thinking_FR_aktiv.pdf

Tener en cuenta estos aspectos contribuirá a promover la responsabilidad, la pertinencia y el intercambio en relación con la tecnología digital, ayudando a que los sistemas alimentarios sean sostenibles, especialmente en el contexto de la transición agroecológica[84] El trazado de esta trayectoria conducirá la investigación, no sólo en cuanto a la elección de los temas de investigación –identificados en este capítulo– sino también al posicionamiento de la investigación. Recomendamos, como mínimo, recurrir a enfoques como la Investigación e Innovación Responsables o RRI (Stilgoe et al., 2013). La RRI, aún poco empleada en la agricultura digital, se basa en los siguientes principios: anticipación (qué pasará si...impacto positivo/negativo), reflexividad (qué significa la responsabilidad digital, qué límites tienen nuestras hipótesis/elecciones/conocimientos, etc.), inclusión (con quién y para quién, qué valores) y capacidad de respuesta (cómo ajustar las trayectorias de desarrollo en respuesta a las circunstancias cambiantes). Se basa en la investigación transdisciplinaria. El desarrollo de la tecnología para la agricultura digital en el marco de la RRI ayudaría a afrontar los retos identificados, teniendo en cuenta el contexto global y las consideraciones sobre la necesidad de integrar una visión sistémica, entre otras cuestiones como la frugalidad, seguridad y resiliencia.

Definición

El concepto de RRI (Investigación e Innovación Responsables), adoptado en la década de 2010 (Owen et al. , 2012; Pellé et Reber, 2015; Stilgoe et al., 2013) se caracteriza por cuatro aspectos clave, "la anticipación, la reflexividad, la inclusión y la capacidad de respuesta", todos los cuales deben aplicarse a lo largo del proceso de investigación e innovación (Stilgoe et al., 2013). La investigación sobre la RRI en la agricultura sigue siendo escueta y no se ocupa específicamente de la agricultura digital. Sin embargo, desde finales de la década de 2010, Klerkx y Rose (2020) han observado un creciente interés en la RRI dentro de la agricultura (Bronson, 2019; Eastwood et al., 2019; Rose y Chilvers, 2018).

84. Responsabilidad: equidad, inclusión, frugalidad (impacto medioambiental), avanzar hacia la tan necesaria diversificación de culturas, prácticas y productos en un contexto de reducción de insumos, garantizar la asimilación por parte de un amplio abanico de partes interesadas. Pertinencia: satisfacer las necesidades reales, aportando soluciones eficaces y aceptables que preserven la diversidad y la libertad. Compartir: que los usuarios puedan hacer uso de sus conocimientos y datos locales, dar su opinión sobre los resultados (suponiendo que éstos sean claros y estén bien comunicados, con una estimación de la incertidumbre), y actuar sobre los parámetros de las herramientas manteniéndose dentro de un marco plausible.

Conclusión

La evolución de la agricultura y los sistemas alimentarios será uno de los retos más importantes en los próximos años. Como se ha explicado en este libro blanco, la agricultura ya se enfrenta –y lo seguirá haciendo– a grandes retos, algunos de los cuales son: la seguridad alimentaria y cómo alimentar al mundo en condiciones ecológicas y climáticas difíciles (cambio climático, erosión de la biodiversidad, pérdida de la fertilidad del suelo, etc.); los cambios en los modelos agrícolas a través de la transición agroecológica en aras de limitar el impacto medioambiental; la diversificación de los sistemas de producción; la evolución hacia una mayor integración regional; la soberanía alimentaria, etc.

Desafíos para la investigación

La revolución digital avanza en varios campos y la agricultura digital es tanto un componente como una consecuencia de ella. En este libro blanco se ha presentado a grandes rasgos la investigación actual en materia de tecnología digital para afrontar los retos de la agricultura. Los temas tratados han sido los datos y sus procesos en términos generales (desde su adquisición hasta su almacenamiento), el modelado, el aprendizaje y la extracción de conocimientos, la ingeniería del conocimiento con fines de apoyo a la toma de decisiones o la automatización y la robótica. Asimismo, se ha presentado el abanico de oportunidades que presenta el uso de la tecnología digital en la agricultura para mejorar la producción, promover la agroecología y adaptarse a los cambios externos. Esta gama de oportunidades también incluye una mejor integración dentro de las cadenas de valor y la mejora del intercambio, el aprendizaje y la comprensión. No obstante, la investigación actual sólo se ocupa de algunas de las oportunidades que se han identificado. Además, si bien esta tecnología tiene el potencial de empoderar a los usuarios, los riesgos también son grandes, entre los que se incluyen la pérdida de la transición agroecológica, el aumento de la desigualdad y desequilibrios de poder, la pérdida de soberanía y la excesiva complejidad. En relación con estas oportunidades y riesgos, y en vistas del estado actual de la investigación, hemos procurado mostrar los principales obstáculos que habrá que superar para ampliar la agricultura digital de forma sostenible y responsable, promoviendo la agroecología, adaptándose al cambio climático y equilibrando y reterritorializando las cadenas de valor.

Entre los muchos retos que se exponen en este documento, hay algunos que consideramos especialmente importantes y convenientes para ser abordados conjuntamente por INRAE e Inria:

- En cuanto a los datos, ¿cuáles son los más relevantes que hay que adquirir a diferentes niveles (plantas, animales, parcelas, rebaños, explotaciones, regiones, etc.)? ¿Cómo se pueden adquirir e intercambiar estos datos minimizando los

costos energéticos y garantizando el acceso y la privacidad? La heterogeneidad de los datos es algo propio del aumento de la cantidad de sistemas diferentes. Será necesario aprovechar esta heterogeneidad, que proporciona redundancia y complementariedad, siendo ambos factores necesarios para mejorar los resultados de las mediciones.

- A la hora de apoyar a los agricultores: ¿qué conocimientos habrá que crear? ¿Cuál es la mejor manera de utilizar y analizar los datos para descubrir estos conocimientos? ¿Y cómo se pueden combinar los nuevos conocimientos con los ya existentes? ¿Cómo se puede compartir la información con los agricultores (visualización)? ¿Cómo se les puede ayudar en la toma de decisiones mediante el uso de herramientas de diagnóstico o de apoyo a la toma de decisiones? ¿Qué robots habrá que desarrollar para que la agroecología se amplíe? Las partes interesadas de los ámbitos digital y agrícola tendrán que trabajar juntas para encontrar estas nuevas soluciones.

- La incertidumbre es algo intrínseco de los procesos de la biología, el clima, la meteorología, etc., en particular en los sistemas de producción agrícola que implementan un enfoque agroecológico. ¿Cómo se puede modelar la complejidad vinculando modelos entre sí (por ejemplo, los gemelos digitales) mientras se controla la propagación de la incertidumbre? ¿Cómo se puede incorporar la complejidad a los modelos y transmitirla para permitir una toma de decisiones informada? La gestión de esta incertidumbre requerirá la combinación de conocimientos de diferentes disciplinas de observación (según la escala, puede tratarse de biología, fisiología, agronomía, ingeniería regional, etc.), así como de matemáticas e informática.

- La participación ha demostrado ser una palanca eficaz en el marco de la transición agroecológica y la transformación de los sistemas alimentarios, mediante la recopilación de datos, mediación, gobernanza, intercambio de experiencias, etc. El objetivo será utilizar la tecnología digital para los procesos participativos, es decir, en crowdsourcing; en los modelos de apoyo; en la mediación u objetos limítrofes; en el compartir, gestionar e integrar (con otros sistemas) datos y conocimientos.

- La trazabilidad, la transparencia y, en un sentido más amplio, la documentación de los productos, a lo largo de toda la cadena de producción, se están convirtiendo en consideraciones clave para los sistemas agroalimentarios. Actualmente, se debe considerar qué datos deben ser "rastreados", documentados y compartidos (sobre todo en relación con los productos perecederos) y cómo elegir las herramientas adecuadas para su almacenamiento y transmisión (por ejemplo,

la blockchain).

- La ciberseguridad es fundamental para la soberanía alimentaria en lo que respecta a la protección de la producción agrícola y de la información que se genera en el marco de la misma o que está vinculada a ella.

Por último, hay que tener en cuenta que existen varios modelos agrícolas y que en el futuro la diversidad será aún mayor (véase la previsión del JRC[85] o de la CSIRO)[86], lo que dará lugar al desarrollo de tipos de tecnología digital adaptados a cada modelo.

Recomendaciones

En conclusión, tenemos una serie de recomendaciones para la investigación que consideramos importantes para el futuro de la tecnología digital en la agricultura.

A la luz de los grandes retos citados anteriormente a los que se enfrenta y se enfrentará la agricultura en el futuro, la tecnología digital puede ser una palanca importante para que la agricultura pueda hacer frente a estos desafíos, favoreciendo la transición agroecológica y la de los sistemas alimentarios. Sin embargo, como hemos visto, la tecnología digital también conlleva riesgos, tanto en términos medioambientales como humanos (el costo de los recursos, la deshumanización de la agricultura, el aumento de las desigualdades, etc.), que deben tenerse en cuenta en las futuras investigaciones. Recomendamos los siguientes principios fundamentales: i) adoptar una visión sistémica considerando el sistema en su conjunto y la complejidad de los sistemas alimentarios y agrícolas, ii) promover la frugalidad para que los beneficios de la tecnología digital no se produzcan a expensas del aumento del consumo de energía, perjudicando el impacto global, iii) priorizar la resiliencia, es decir, la capacidad de los sistemas agrícolas asistidos digitalmente para resistir las crisis y adaptarse a diferentes tipos de cambios (relacionados con el clima, la economía, salud, métodos de trabajo, etc.), iv) aprovechar la diversidad de los sistemas agrícolas, utilizando la tecnología digital para apoyar la agricultura en todas sus formas. A este respecto, recomendamos adoptar el enfoque de la investigación y la innovación responsables o RRI (véase el Capítulo 6). Por último, en aras de adoptar una visión sistémica y ante la complejidad de los posibles temas de estudio, hay que evitar que la investigación

85. https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC122308/farmers_of_the_future_final_online.pdf
86. https://research.csiro.au/digiscape/digiscapes-social-dimensions-project-what-did-we-learn/

sea excesivamente sectorial para poder abordar efectivamente los problemas planteados (véase el Capítulo 5). En consecuencia, será importante adoptar un enfoque interdisciplinario y participativo en nuestras investigaciones sobre el uso de la tecnología digital en la agricultura y destacar la importancia de este tipo de enfoque e investigación en nuestros institutos.

Nuestro objetivo no es trazar un camino exacto a seguir, pero dado el amplio panorama que hemos expuesto a lo largo de este documento, creemos que han surgido una serie de temas y principios clave que podrían servir de base de las decisiones adoptadas en el futuro. Como hemos señalado al principio de este documento, creemos firmemente que la agricultura debe evolucionar hacia la agroecología y los sistemas alimentarios sostenibles y que la tecnología digital tiene la capacidad de ser una poderosa herramienta en esta transición, siempre que seamos conscientes de ciertas trabas. Nuestras recomendaciones se basan en esta creencia.

Temas de investigación

Dentro de los temas de investigación mencionados, uno de los puntos que nos parece más importante es que **la agroecología dará lugar a la necesidad de generar grandes cantidades de nuevos conocimientos.** Lo más probable es que estos conocimientos se generen a raíz de la tecnología digital, es decir, gracias, en parte, a la recopilación de datos a gran escala, pero también al seguimiento de nuevos indicadores (por ejemplo, la biodiversidad intraespecífica e interespecífica, caracterizada por los datos genómicos), la gestión de estas grandes cantidades de datos y la extracción de conocimientos basados en datos totalmente nuevos a todos los niveles (desde la microbiota hasta las imágenes por satélite). Esta investigación puede distinguirse de la ciencia de datos no especializada de varias maneras:

1) los enfoques empleados deben tener en cuenta los contextos locales, centrándose en la consideración de los conocimientos existentes y en recopilar y establecer el conocimiento experto de los agricultores;

2) la generación de estos datos (ya sean medidos o simulados) está convirtiéndose en un reto, lo que conlleva interrogantes relacionadas con la calidad de los datos producidos, el preprocesamiento y su disponibilización. La convergencia de los datos de fenotipos –sobre todo en entornos reales– con los datos genómicos debería acelerar la creación de conocimientos sobre los procesos dentro de la

agroecología, la selección de variedades o la construcción de nuevas rutas culturales para anticiparse al cambio climático. Otro punto clave a tener en cuenta serán **las herramientas digitales para ayudar a los agricultores, asesores y otras partes interesadas a nivel sectorial o regional.** Se trata, en primer lugar, de las herramientas de apoyo a la toma de decisiones, que serán la interfaz principal para la aplicación de los conocimientos, en particular en relación con lo que se ha comentado anteriormente. Estas herramientas, que ocupan un lugar central en el diálogo entre los seres humanos y los modelos digitales, requerirán una investigación específica basada en la ciencia del diseño, la visualización y la ergonomía para facilitar su adopción. Tomar en consideración las especificidades locales y opciones técnicas de los operadores/decisiones políticas a nivel regional será esencial para evitar una tendencia a la homogeneidad en la agricultura. Los enfoques examinados deben ser capaces de explicar/justificar las recomendaciones que se hagan para permitir un diálogo constructivo con los participantes humanos. Por otra parte, habrá que inventar nuevas soluciones de asistencia robótica para evitar que los agricultores tengan que realizar las tareas más arduas o peligrosas. Además de las preguntas de investigación relacionadas con la navegación en entornos no controlados, la seguridad y la interacción entre las herramientas y los robots que las portan, creemos que adoptar un enfoque participativo para diseñar estas soluciones robóticas es un medio prometedor para reducir la tensión entre tecnología y ecología.

Un tercer enfoque para la investigación en informática está motivado por el hecho de que los procesos dentro de la agroecología –en un sentido amplio– se extienden más allá de los predios agrícolas hacia las cadenas de valor y las regiones. En lo que respecta a estos ámbitos, debe darse prioridad a la **investigación operativa sobre cuestiones relacionadas con la planificación** (en el tiempo y el espacio) del uso de los recursos (agua, suelo) y la producción agrícola (suministro a gran escala basado en fuentes fragmentadas).

Por último, como ocurre con todos los sistemas digitales estudiados, **la ciberseguridad** es de vital importancia. En el ámbito de la agricultura, ésta debe adoptar varias formas. Se trata de asegurar no tan solo los datos en sí, sino también los sistemas materiales que los generan, las redes que los transportan y las herramientas que los utilizan, para garantizar que ninguno de ellos sea hackeado (podrían interceptarse los datos o introducirse datos falsos). Una posible vía a explorar consiste en combinar los sistemas de seguridad "tradicionales" con nuevas técnicas de aprendizaje que se aplicarían exclusivamente a los datos agrícolas, con el fin de identificar y aislar los nodos maliciosos y/o detectar las fugas de información.

Tipos de investigación

Recomendamos adoptar el enfoque de la **investigación e innovación responsables** o RRI (véase el Capítulo 6). Para comprender plenamente la complejidad del tema, es necesario tomar medidas para que la investigación no sea excesivamente sectorial (véase el Capítulo 5), lo que implicará adoptar una visión sistémica. Por consiguiente, será efectivamente importante adoptar un enfoque interdisciplinario y participativo en nuestros estudios sobre el uso de la tecnología digital en la agricultura y destacar la importancia de este tipo de orientación e investigación dentro de nuestros institutos.

Esta visión sistémica también nos ayudará a abordar el problema del impacto medioambiental de las soluciones digitales. Existen diferentes formas de abordar las vías de investigación señaladas anteriormente, algunas de las cuales requerirán el consumo de una cantidad significativa de energía o de recursos escasos. Para evitar este problema, recomendamos que se adopte un enfoque **frugal:** los beneficios de la tecnología digital no deben generarse de forma tal que dé lugar a un consumo excesivo de energía, perjudicando el impacto global. La mejor manera de evaluar este impacto es emplear una visión sistémica, considerando el sistema en su conjunto y la complejidad de los sistemas agrícolas y alimentarios (en lugar de optimizar un solo indicador).

También nos parece fundamental que cualquier investigación futura haga hincapié en la resiliencia, es decir, en la capacidad de los sistemas agrícolas asistidos por medios digitales para resistir a las crisis y adaptarse a diferentes tipos de cambios (relacionados con el clima, la economía, salud, métodos laborales, etc.). Por último, dado que existen muchos tipos de agricultura, será necesario aprovechar la diversidad de los sistemas agrícolas, **utilizando la tecnología digital para apoyar la agricultura en todas sus formas.**

Ciencias sociales

Esperamos que este documento haya demostrado que el uso de la tecnología digital en la agricultura no es simplemente una cuestión de tecnología. A todos los niveles, las soluciones existentes o previstas están en consonancia con los actores humanos e, incluso, pueden constituir una forma de reunir a las distintas partes interesadas. **La investigación en el ámbito de las humanidades es, por tanto, una parte integrante de la investigación sobre el uso de la tecnología digital en la agricultura.** Una primera interrogante, que tal vez no sea nueva pero que será cada vez más importante, es el vínculo entre los seres humanos y las soluciones tecnológicas cada vez más complejas: ¿cómo construir una relación armoniosa y

satisfactoria entre estas soluciones y los seres humanos que las utilizan? ¿Cómo se puede evitar el riesgo de la descualificación? Una vía que parece especialmente prometedora es la de hacer hincapié en los enfoques participativos del diseño, identificando la mejor manera de implicar a las partes interesadas del sector en la fase más temprana posible. Estos enfoques van más allá del diseño de herramientas: una de las principales preocupaciones es aprovechar la tecnología digital para descubrir nuevas formas de colaboración entre los seres humanos. Esto será especialmente beneficioso cuando se trate de mejorar la gestión de los recursos compartidos, donde los intereses colectivos e individuales pueden entrar en conflicto.

Políticas públicas

Por último, la "transición digital" en la agricultura está provocando cambios que habrá que abordar a nivel de políticas públicas. El aspecto que nos parece más importante es la **gobernanza de los datos.** Las nuevas tecnologías han transformado a los agricultores en productores de datos, ya sea a través de los sensores que utilizan o gracias al ingreso manual por su parte (enfoques participativos). Es urgente tener en cuenta el valor de estos datos, así como los derechos de autor y la privacidad. Se trata de una cuestión complicada: por un lado, compartir las enormes cantidades de datos producidos puede beneficiar a todos, pero por otro lado una apertura excesiva puede hacer que las explotaciones o las regiones sean menos competitivas. En la actualidad, una parte de estos datos está en manos de empresas privadas (por ejemplo, proveedores de tecnología y servicios), que se benefician de una visión global sin que haya necesariamente una gran reciprocidad con respecto al sector agrícola. Para evitar este obstáculo, el Consejo Nacional Digital de Francia recomienda conceder a los datos agrícolas el estatus de bien común [87]

Otro tema clave será trabajar en una mejor **cuantificación y análisis de los flujos de materiales a diferentes niveles regionales** para facilitar la implementación de modelos económicos alternativos que pertenecen al ámbito de la bioeconomía o la economía biofísica.

87. https://cnnumerique.fr/tribune-agriculture

Inria-INRAE: una asociación idónea para abordar esta investigación

En consonancia con sus propias misiones, la unión de nuestros dos institutos –Inria e INRAE– será beneficiosa para abordar los temas señalados en relación con la agricultura digital, gracias a la complementariedad de los enfoques y las competencias que se pueden aprovechar. El aporte de INRAE consiste en su cultura de herramientas experimentales y la recopilación de datos; sus competencias en el modelado de sistemas biológicos, integrados por paneles de expertos y modelos extensivos; y su experiencia en economía y ciencias sociales, con un enfoque particular en la agricultura y sus actores, regiones y redes, enriquecida a través del contacto con la profesión y el conocimiento de las necesidades. Y la contribución de Inria consiste en su experiencia en ciencias y tecnologías digitales –matemáticas e informática–, en particular en el modelado, la simulación, inteligencia artificial, ciencia de datos, ciberseguridad, redes y robótica, además de su cultura, arraigada simultáneamente en la investigación, el desarrollo tecnológico, la transferencia y la innovación.

Los dos institutos cuentan con una larga historia de colaboración e interacción entre ellos (equipos de proyectos conjuntos, doctorados supervisados conjuntamente, jornadas científicas organizadas conjuntamente, etc.), algo que se ha reforzado recientemente a través de proyectos emblemáticos como #DigitAg (véase el recuadro) y el **PEPR (Priority Equipment Programme for Research)** "Estrategia de Agroecología y Aceleración Digital" SADEA, lanzado en 2021 y dirigido conjuntamente por los dos institutos. Estas colaboraciones han demostrado ser muy gratificantes para los investigadores involucrados. Teniendo en cuenta los retos sin precedentes que plantea la transición digital y agroecológica en la agricultura, esta colaboración sin lugar a dudas se fortalecerá más en el futuro. Juntos, y acompañados de sus socios históricos en agronomía (CIRAD, las grandes escuelas de agronomía, IRD, CGIAR, etc.) y en matemáticas e informática (las universidades, CNRS, etc.), los dos institutos tienen claramente el potencial para abordar estos retos y responder a las grandes expectativas por parte de la sociedad en materia de agricultura.

Más información

#DigitAg *o* ***Digital Agriculture Convergence Lab,*** dirigido por INRAE, es uno de los diez laboratorios de convergencia franceses financiados por el Programa de Inversiones para el Futuro (9,9 millones de euros). Con sede en Montpellier y sucursales en Toulouse, Rennes y Aviñón, reúne a más de 550 personas (cifras del año 2020) de 8 organismos públicos y parapúblicos y cuenta con el apoyo de 8 empresas del ámbito de AgTech. Lanzado en 2017 con una duración inicial de ocho años, su objetivo es preparar el desarrollo armonioso de la tecnología digital en la agricultura, tanto en Francia como en el Sur Global. Para ello, su trabajo consiste en desarrollar una investigación multi- e interdisciplinaria, con unos 60 doctorados cofinanciados, una veintena de doctorados etiquetados, 12 investigadores postdoctorales y 150 plazas de magíster financiadas. Se ha establecido una escuela de posgrado para crear un inventario de recursos educativos para este sector y han surgido nuevos cursos (ciencia de los datos). Por último, el instituto está concienciando a los estudiantes sobre la innovación a través de encuentros con empresas, cursos sobre propiedad intelectual, un departamento de desarrollo informático para la elaboración de demostraciones web basadas en los resultados del doctorado y un observatorio de los diferentes usos de la tecnología digital en la agricultura. Es muy activo a nivel internacional, con un enfoque particular en el Sur Global, y cuenta con varios equipos de INRAE e Inria trabajando juntos.

Contribuciones y agradecimientos

Las siguientes personas han aportado a la redacción de este libro blanco:

Nombre	Unidad del instituto, sitio	Integrante	Capítulos
Bellon-Maurel, Véronique	INRAE, UMR ITAP, Montpellier	#DigitAg, Digigral	Co-editor
Bisquert, Pierre	INRAE, unidad mixta de investigación IATE, Montpellier	#DigitAg, Digigral	6
Bonnet, Pascal	CIRAD, Dept E&S, Montpellier	#DigitAg	4, 6
Bouadi, Tassadit	Univ. of Rennes 1, Lacodam, Inria Rennes - Bretagne Atlantique	#DigitAg	3, 6
Brossard, Ludovic	INRAE, unidad mixta de investigación PEGASE, Rennes	#DigitAg, Digigral	Co-editor
Chambaz, Grégoire	Unisanté, Lausanne, Suisse		5
Courtonne, Jean-Yves	Inria, STEEP, Grenoble		4
Dedieu, Benoit	INRAE, unidad mixta de investigación ACT, Theix		2
Gandon, Nathalie	INRAE, 'IT and freedoms' officer		5
Garcia, Frédérick	INRAE, unidad de investigación MIAT, Toulouse	#DigitAg	Co-editor
Gautron, Romain	CIRAD, AIDA	#DigitAg	3
Hilgert, Nadine	INRAE, unidad mixta de investigación MISTEA, Montpellier	#DigitAg	3
Ienco, Dino	INRAE, unidad mixta de investigación TETIS, Montpellier	#DigitAg	3
Javelle, Aurélie	L'Institut Agro-Montpellier SupAgro, unidad mixta de investigación Innovation, Montpellier	#DigitAg	5
Labarthe, Pierre	INRAE, unidad mixta de investigación AGIR, Toulouse	#DigitAg, Digigral	4, 5, 6
Lagacherie, Philippe	INRAE, unidad mixta de investigación LISAH, Montpellier	#DigitAg, Digigral	Seminario
Largouët, Christine	L'Institut Agro- Rennes, Lacodam, Inria Rennes - Bretagne Atlantique	#DigitAg	3
Lenain, Roland	INRAE, unidad de investigación TSCF, Clermont-Ferrand		3, 6
Lutton, Evelyne	INRAE, unidad mixta de investigación MIA, Paris	Digigral	3, 6

Name	Institute unit, site	Member	Chapters
Martin-Clouaire, Roger	INRAE, unidad de investigación MIAT, Toulouse	#DigitAg	3
Masson, Véronique	Univ. of Rennes 1, Lacodam, Inria Rennes - Bretagne Atlantique	#DigitAg	3
Maurel, Pierre	INRAE, unidad mixta de investigación TETIS, Montpellier	#DigitAg	4, 6
Mitton, Nathalie	Inria, FUN, Lille		Co-editor
Molenat, Jérôme	INRAE, unidad mixta de investigación LISAH, Montpellier	#DigitAg	Seminario
Mugnier, Marie-Laure	LIRMM, Inria, Montpellier	#DigitAg	3
Neveu, Pascal	INRAE, unidad mixta de investigación MISTEA, Montpellier	#DigitAg	3
Piot-Lepetit, Isabelle	INRAE, unidad mixta de investigación MOISA, Montpellier	#DigitAg, Digigral	6
Pla Aragones, Lluis Miquel	Université de Lleida, Espagne		6
Prados, Emmanuel	Inria, STEEP, Grenoble		2, 5
Preux, Philippe	Inria, Scool, Lille		3
Raynal, Hélène	Unidad mixta de investigación AGIR, Toulouse	#DigitAg	3
Reboud, Xavier	INRAE, Unidad de Investigación Mixta de Agroecología, Dijon		6
Roussey, Catherine	INRAE, unidad de investigación TSCF, Clermont-Ferrand		3
Termier, Alexandre	Univ. of Rennes 1, Lacodam, Inria Rennes Bretagne Atlantique	#DigitAg	Co-editor

Apoyo financiero a los programas: #DigitAg, el Digital Agriculture Convergence Lab –financiación gestionada por la Agencia Nacional de Investigación Francesa (ANR-16-CONV-0004) en el marco del Programa de Inversiones para el Futuro– y Digigral, un grupo multidisciplinario encargado por INRAE de construir un programa sobre la digitalización de los sistemas agroalimentarios.

Quisiéramos agradecer a Hervé Monod, de INRAE, y a Jacques Sainte-Marie y Pascal Guitton, de Inria, por seguir de cerca el desarrollo de los trabajos, y a la dirección de ambos institutos por su confianza y apoyo.

Referencias bibliográficas

CAPÍTULO 1

Bellon-Maurel, V., Huyghe, C. (2016) ***L'innovation technologique en agriculture.*** Géoéconomie, 80 – 159-180.

Blezat Consulting, CREDOC, Deloitte Développement Durable (2017). ***Étude prospective sur les comportements alimentaires et élaboration d'un dispositif de suivi,*** Étude commandée par le centre d'étude et prospective du ministère de l'Agriculture, 123p., disponible à https://agriculture.gouv.fr/etude-prospective-sur-les-comportements-alimentaires-de-demain.

Caquet, T., Gascuel, C., Tixier-Boichard, M. (2020) ***Agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires.*** Éd Quae, Collection : Matière à débattre et décider, 104 p.

DGE (2019) ***Technologies-clés - Préparer l'industrie du futur 2020,*** **640 p**. Disponible à https://www.entreprises.gouv.fr/files/files/directions_services/politique-et-enjeux/innovation/technologies-cles-2020/technologies-cles-2020.pdf.

Dinesh, D., Campbell, B., Bonilla-Findji, O., Richards, M. (eds). (2017). ***10 best bet innovations for adaptation in agriculture: A supplement to the UNFCCC NAP Technical Guidelines.*** *CCAFS Working Paper no. 215. Wageningen, The Netherlands: CGIAR Research Program on Climate Change, Agriculture and Food Security (CCAFS).* Disponible à https://www.agroforesterie.fr/actualites/2017/documents/10-best-bet-innovations-for-adaptation-in-agriculture-A-supplement-to-the-UNFCCC-NAP-Technical-Guidelines-CGIAR-Research-Program-on-Climate-Change-Agriculture-and-Food-Security-CCAFS.pdf.

FAO (2018a) ***The future of food and agriculture: alternative ways to 2050,*** FAO, Rome, 202 p.

FAO (2018b), ***Initiative de passage à l'échelle supérieure de l'agroécologie,*** disponible à http://www.fao.org/3/I9049FR/i9049fr.pdf.

FAO (2019) ***Digital Technologies in Agriculture and Rural Areas*** – *Briefing Paper.* 18 p. Disponible à http://www.fao.org/3/ca4887en/ca4887en.pdf.

Isaac, H., Pouyat, M. (2015) ***Les défis de l'agriculture connectée dans une société numérique.*** Ed. Renaissance Numérique, Paris (Fr),106 p., disponible à : https://www.renaissancenumerique.org/system/attach_files/files/000/000/010/original/LB_AGRI_HD.pdf?1485335906.

Malassis, L. (1994) ***Nourrir les Hommes,*** Dominos – Flammarion, Paris, 110 p.

OCDE (2019) ***Digital Opportunities for Better Agricultural Policies***. 23 Sep 2019, 234 p. (EPUB). https://doi.org/10.1787/571a0812-en.

Owen, R., Macnaghten, P., Stilgoe, J., (2012). ***Responsible research and innovation: from science in society to science for society, with society.*** *Sci. Public Policy 39*, pp 751–760.

Scandurra, A., Picchio, C., Ruffino, C., Piertaccini, M., Rocha da Silva, W., Marguglio, A., Antonucci, C., Coraretti, E., Castiello d'Antonio, A. (2020) ***Smart agriculture: Digitalizing the entire agriculture chain from the field to production, up to the management of national and international funds.*** *Ed. Engineering, Italy*, disponible à https://h2020-demeter.eu/smart-agriculture-agriculture-4-0-the-digital-transformation-of-the-agricultural-sector/.

Scholz, R. W., Bartelsman, E.J., Diefenbach, S. , Franke, L., Grunwald, A., Helbing, D., Hill, R., Hilty, L., Höjer, M., Klauser, S., Montag, C., Parycek, P., Prote, J.P., Renn, O., Reichel, A., Schuh, G., Steiner, G., Viale Pereira, G. (2018) ***Unintended Side Effects of the Digital Transition: European Scientists' Messages from a Proposition-Based Expert Round Table.*** *Sustainability*, 10, 2001.

The Hale Group & LSC (2014) ***Digital Transformation of Row Crop Agriculture.*** *A Report to the Iowa AgState Group*, 27 p., disponible à https://www.iasoybeans.com/pdfs/AgStateExecutiveSummary.pdf

CAPÍTULO 2

Bai, J., Seale, J.L., Jr and Wahl, T.I. (2020) ***Meat demand in China: to include or not to include meat away from home?*** *Aust J Agric Resour Econ*, 64: 150-170.

Bergez, J.-E., Audouin, E., Therond, O. (2019) ***Agroecological Transitions: From Theory to Practice in Local Participatory Design,*** *Springer International Publishing*, XVI, 335 p.

Brown, L. R. (2012) ***Full Planet, Empty Plates*** *– The New Geopolitics of Food Scarcity, W. W. Norton & Co, New-york & London.*

Caquet, T., Gascuel, C., Tixier-Boichard, M. (2020) ***Agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires.*** Éd Quae, Collection : Matière à débattre et décider, 104 p.

Charrier, F., Mourad, H., Barbier, M. (2020) ***Rendre l'ingérable gérable par la transformation collective de la situation de gestion : étude du cas de la gestion d'une maladie animale en Corse.*** *Gérer et Comprendre. Annales des Mines,* 139, 33-45.

CITEPA (2018). ***Rapport Secten, Gaz à effet de serre et polluants atmosphériques, Bilan des émissions en France de 1990 à 2017.*** https://www.citepa.org/fr/secten/;

FAO, FIDA, OMS, PAM, UNICEF. (2017) ***L'état de la sécurité alimentaire et de la nutrition dans le monde 2017. Renforcer la résilience pour favoriser la paix et la sécurité alimentaire*** Rome, FAO.

FAO (2019a) ***The State of the World's Biodiversity for Food and Agriculture***, Bélanger, J. & Pilling, D. (eds.). *FAO Commission on Genetic Resources for Food and Agriculture Assessments.* FAO, Rome. 572 p.

FAO (2019b).* ***La situation mondiale de l'alimentation et de l'agriculture 2019. Aller plus loin dans la réduction des pertes et gaspillages de denrées alimentaires.*** FAO, Rome.

Gasselin, P., Choisis, J.P., Petit, S., Purseigle, F., Zasser, S. (2015). ***L'agriculture en famille : travailler, réinventer, transmettre.*** EDP Sciences.

Gasselin, P., Lardon, S., Cerdan, C., Loudiyi, S., Sautier, D., Van der Ploeg, J. D. (2021) ***Coexistence et confrontation des modèles agricoles et alimentaires : un nouveau paradigme du développement territorial.*** Éditions Quae.

Geels, F.W. (2002) ***Technological transitions as evolutionary configuration processes: A multi-level perspective and a case-study.*** *Res. Policy*, 31, 1257-1274.

Ghai, D. (2003) ***Travail décent : concept et indicateurs.*** *Revue internationale du Travail*, 42 (2), 121 – 157.

Gibbs, E.P.J (2014) ***The evolution of One Health: a decade of progress and challenges for the future.*** *Veterinary Record*, 174(4), 85-91.

GIEC (2014). ***Contribution du groupe de travail II au cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.*** Disponible le 20-04-2021 sur https://repository.uneca.org/handle/10855/23228.

Hervieu, B., Purseigle, F. (2013). ***Sociologie des mondes agricoles.*** Paris : Armand Colin.

HLPE (2016). ***Sustainable agricultural development for food security and nutrition: what roles for livestock?*** *A report by the High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security.* Rome, *Italy.* http://www.fao.org/3/a-i5795e.pdf.

Porcher, J. (2011) ***Vivre avec les animaux. Une utopie pour le XXIIème siècle.*** Éd La Découverte/Mauss.

Sánchez-Bayo, F., Wyckhuys, K. A.G. (2019) ***Worldwide decline of the entomofauna: A review of its drivers,*** *Biological Conservation*, 232, 8-27.

Therond, O., Duru, M., Roger-Estrade, J., Richard, G. (2017) ***A new analytical framework of farming system and agriculture model diversities: a review. Agronomy for Sustainable Development,*** 37, 21.

UNESCO (2019). ***Rapport mondial des Nations Unies sur la mise en valeur des ressources en eau 2019 : ne laisser personne pour compte.*** Disponible le 20-04-2021 sur https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000367303_fre.locale=fr.

Zinsstag, J., Schellin, E., Waltner-Toews, D., Whittaker, M., Tanner, M. (2015) ***One Health: The Theory and Practice of Integrated Health Approaches,*** *CAB International, Wallingford, UK.*

CAPÍTULO 3

Abdullah, A., Hussain, A. (2006) ***Data mining a new pilot agriculture extension data warehouse.*** *Journal of Research and Practice in Information Technology* 38.3, 229.

Akplogan, M., de Givry, S., Metivier, J.P., Quesnel, G.; Joannon, A., Garcia, F. (2013) ***Solving the Crop Allocation Problem using Hard and Soft Constraints.*** *RAIRO – Operations Research, EDP Sciences*, 47 (2), 151-172.

Aubin, S., Caracciolo, C., Zervas, P., Aventurier, P., Buche, P., Ferreyra, A., Xian, G., Jonquet, C., Koukourikos, A., Pesce, V., Pierozzi, I.J., Roussey, C., Toulet A., Villa, F., Whitehead, B., Zhang, X., Antezana, E. (2017) ***Landscaping the Use of Semantics to Enhance the Interoperability of Agricultural Data****. RDA Agrisemantics Working Group.*

Bahri, O., Mourhir, A., Papageorgiou, E.I. (2020) ***Integrating fuzzy cognitive maps and multi-agent systems for sustainable agriculture.*** Euro-Mediterr J *Environ Integr* 5, 7.

Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., Azli, N. N., Talib, M. F. (2016) ***Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic.*** *Jurnal Teknologi*, 78 (6 13), 137–143.

Benchini, L., Stöckle, C.O. (2007) ***Integration of a cropping systems simulation model and a relational database for simple farm-scale analyses.*** *Agronomy Journal*, 99 (5), 1226-1237.

Bédard, Y., Rivest, S., Proulx, M.-J. (2007) ***Spatial online analytical processing (SOLAP): Concepts, architectures, and solutions from a geomatics engineering perspective. Data warehouses and OLAP: concepts, architectures and solutions.*** *IGI Global*, 298-319.

Bellon-Maurel, V., Neveu, P., Termier, A., Garcia, F. (2018) ***Le Big Data en agriculture. Annales des Mines – Enjeux numériques 2, 77-81.*** http://annales.org/enjeux-numeriques/2018/resumes/juin/16-en-resum-FR-AN-juin-2018.html .

Bergerman, M., Billingsley, J., Reid, J., van Henten, E. (2016) ***Robotics in Agriculture and Forestry, in Springer Handbook of Robotics,*** *Springer International Publishing*, 1463–1492.

Bergez, J.E., Eigenraam, M., Garcia, F. (2001) ***Comparison between dynamic programming and reinforcement learning: a case study on maize irrigation management,*** in: *Proceedings of the 3rd European Conference on Information Technology in Agriculture (EFITA01),* Montpellier, pp. 343–348.

Bermeo-Almeida, O., Cardenas-Rodriguez, M., Samaniego-Cobo, T., Ferruzola-Gómez, E., Cabezas-Cabezas, R., Bazán-Vera, W. (2018) ***Blockchain in Agriculture:*** *A Systematic Literature Review.* (eds) ***Technologies and Innovation.*** CITI 2018. *Communications in Computer and Information Science,* 883.

Blender, T., Buchner, T., Fernandez, B., Pichlmaier, B., Schlegel, C. (2016) ***Managing a Mobile Agricultural Robot Swarm for a seeding task,*** *in Industrial Electronics Society*, IECON 2016-*42nd Annual Conference of the IEEE*, 6879–6886.

Bommel, P., Bécu, N., Le Page, C., Bousquet, F., Cormas. (2015) ***An Agent-Based simulation platform for coupling human decisions with computerized dynamics. Simulation and Gaming in the Network Society.*** Volume 9 *of the series Translational Systems Sciences* pp 387-410. *Springer,* 2015.

Bouadi, T., Cordier, M.-O., Moreau, P., Quiniou, R., Salmon-Monviola, J., Gascuel-Odoux, C. (2017) ***A data warehouse to explore multidimensional simulated data from a spatially distributed agro-hydrological model to improve catchment nitrogen management.*** *Environmental Modelling and Software 97*, 229-242.

Boukhelifa, N., Bezerianos, A., Lutton, E. (2018) ***Evaluation of Interactive Machine Learning Systems.*** In: Zhou, J., Chen, F. (eds) *Human and Machine Learning Visible, Explainable, Trustworthy and Transparent,* Springer, 341-360.

Borodin, V. (2014) ***Optimisation et simulation d'une chaîne logistique : application au secteur de l'agriculture,*** Thèse de doctorat de l'Université de Troyes.

Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., Ljung, G. M. (2015) ***Time Series Analysis: Forecasting and Control,*** *5th Edition. Published by John Wiley and Sons Inc.*

Brun-Laguna, K., Diedrichs, A.L., Dujovne, D., Taffernaberry, C., Leone, R., Vilajosana, X., Watteyne, T. (2018) ***Using SmartMesh IP in Smart Agriculture and Smart Building Applications.*** *Computer Communications*, 121, 83-90.

Bu, F., Wang, X. (2019) ***A smart agriculture IoT system based on deep reinforcement learning.*** *Future Generation Computer Systems*, 99, 500-507.

Casagli, F., Zuccaro, G., Bernard, O., Steyer, J.P., Ficara, E. (2021) ***ALBA: a comprehensive growth model to optimize algae-bacteria wastewater treatment in raceway ponds.*** *IWA Publishing Water Research*. 190.p 116734.

Carpentier, A., Gohin, A., Sckokai, P., Thomas, A. (2015) ***Economic modelling of agricultural production: past advances and new challenges.*** *Review of Agricultural and Environmental Studies*, 96 (1), 131-165.

Chandra, P., Gupta, M. K. (2018) ***Comprehensive survey on data warehousing research.*** *International Journal of Information Technology* 10.2, 217-224.

Charvat, K., Charvat Junior, K., Reznik, T., Lukas, V., Jedlicka, K., Palma, R., Berzins, R. (2018) ***Advanced Visualisation of Big Data for Agriculture as Part of Databio Development.*** *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium* (GARS), 2018, 415-418.

Chastant-Maillard, S., Saint-Dizier, M. (2016) ***Elevage de précision.*** Éditions La France Agricole, Paris. 254 p.

Chatelin, M.H., Aubry, C., Poussin, J.C., Meynard, J.M., Massé, J., Verjux, N., Gat,e Ph., Le Bris, X. (2005) ***DéciBlé, a software package forwheat crop management simulation.*** *Agricultural. Systems*, 83, 77–99.

Coquet, F., Mémin, J., Slominski, L. (2002) ***On non continuous dirichlet processes.*** *Journal of Theoretical Probability*, 16, 197–216.

Crespo, O., Bergez, J.-E., Garcia, F. (2010) ***Multiobjective optimization subject to uncertainty: Application to irrigation strategy management.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 74 (1), 145-154.

Daudé, E. (2004) ***Apports de la simulation multi-agents à l'étude des processus de diffusion,*** Cybergeo : *European Journal of Geography*, 2004.

DeAngelis, D.L., Diaz, S.G. (2019) ***Decision-making in agent-based Modeling: A current review and future prospectus.*** *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6 (article 237).

Drewniak, B., Song, J., Prell, J., Kotamarthi, V. R., Jacob, R. (2013) ***Modeling agriculture in the Community Land Model,*** Geosci. *Model Dev.*, 6, 495–515, https://doi.org/10.5194/gmd-6-495-2013.

Ezanno, P., Andraud, M., Beaunée, G., Hoch, T., Krebs, S., Rault, A., Touzeau, S., Vergu, E., Widgren, S. (2020) ***How mechanistic modelling supports decision making for the control of enzootic infectious diseases.*** *Elsevier Epidemics*, 32, 100398.

Fauvel, K., Masson, V., Fromont, E., Faverdin, P., Termier, A. (2019) ***Towards Sustainable Dairy Management*** – *A Machine Learning Enhanced Method for Estrus Detection.* KDD 2019, 3051-3059.

Ferreira, A.E., Ortiz, F., Costa, L.H.M.K, Foubert, B., Amadou, I., Mitton, N. (2020) ***A study of the LoRa signal propagation in forest, urban, and suburban environments.*** *Annals of Telecommunications* – annales des télécommunications, 75(7-8), 333-351.

Fishwick, P. (2007) ***Handbook of dynamic system modeling.*** Chapman & Hall/CRC *Computer and Information Science.*

Foubert, B., Mitton, N. (2019) https://hal.inria.fr/hal-02308015 ERCIM News, ERCIM, In press, pp.37-38.

Foubert, B., Mitton, N. (2021) ***Routing Over Multiple Technologies with RODENT.*** Percom 2021 (Demo) – *19th International Conference on Pervasive Computing and Communications*, Mar 2021, Kassel, *Germany.*

Gauthier, R., Largouët, C., Gaillard, C., Cloutier, L., Guay, F., Dourmad, J.Y. (2019) ***Dynamic modeling of nutrient use and individual requirements of lactating sows.*** *Journal of Animal Science*, 97(7), 2822–2836.

Garcia, F. (1999) ***Use of reinforcement learning and simulation to optimize wheat crop technical management,*** *Proceedings of the International Congress on Modelling and Simulation* (MODSIM'99) Hamilton, *New-Zealand*, pp 801-806.

Georgeff, M., Pell, B., Pollack, M., Tambe, M., Wooldridge, M. (1970) ***The Belief-Desire-Intention Model of Agency.*** *Lecture Notes in Computer Science.* 10.1007/3-540-49057-4_1.

Guastella, D. C. (2018) ***Ground Vehicle Navigation through Traversability Analysis of Outdoor Environments.*** *PHD thesis, Università degli Studi di Catania*, 143 p. http://dspace.unict.it/bitstream/10761/4143/1/GSTDCL91R14D960H-output_file.pdf.

Gosavi, A. (2015). ***Simulation-Based Optimization. Parametric Optimization Techniques and Reinforcement Learning.*** *Springer*, 508p.

Gros de Beler, A. (1998) ***Le Nil.*** Éditions Molière, Paris.

Guan, S., Nakamura, N., Shikanai, T. Okazaki, T., (2008) ***Hybrid Petri nets modeling for farm work flow.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 62 (2), 149-158.

Gutiérrez, R. (2008) ***Papas nativas desafiando al cambio climático: propuesta de adaptación tecnoló.*** *Soluciones Practicas*, 2008 - 80 pages.

Halachmi, I., Guarino, M., Bewley, J., Pastell, M. (2019) ***Smart Animal Agriculture: Application of real-time sensors to improve animal well-being and production.*** *Annual Review of Animal Biosciences*, 7, 403-425.

Hélias, A., Guerrin, F., Steyer, J.P. (2008) ***Using timed automata and model-checking to simulate material flow in agricultural production systems: Application to animal waste management.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 63 (2), 183-192.

Hill, A., Laneurit, J., Lenain, R., Lucet, E. (2020) ***Online gain setting method for path tracking using CMA-ES:*** *Application to off-road mobile robot control. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems* (IROS), 2020, pp. 7697-7702, doi: 10.1109/IROS45743.2020.9340830.

Huber, R., Bakker, M., Balmann, A., Berger, T., Bithell, M., Brown, C., Grêt-Regamey, A., Xiong, H., Bao Le, Q., Mack, G., Meyfroidt, P., Millington, J., Müller, B., Polhill, G., Sun, Z., Seidl, R., Troos, C., Finger, R. (2018) ***Representation of decision-making in European agricultural agent-based models,*** *Agricultural Systems*, 167, 143-160.

Hurley, B., O'Sullivan, B., Allouche, D., Katsirelos, G., Schiex, T., Zytnicki, M., de Givry, S. (2016) ***Multi-Language Evaluation of Exact Solvers in Graphical Model Discrete Optimization.*** *Constraints*, 21(3), 413-434.

Ienco, D., Ose, K., Weber, C. (2019) ***Towards combining Satellite Imagery and VGI for Urban LULC classification.*** JURSE, 1-4.

Jabbar, A., Hansen, K.M.F., Smith, M.L., Smith, L. N. (2017) ***Early and non-intrusive lameness detection in dairy cows using 3-dimensional video.*** *Biosystems Engineering*, 153, 63-69.

Jones, J.W., Antle, M., Basso, B., Boote, B.K., Conant, R.T., Foster, I., Godfray, H.C.J., Herrero, M., Howitt, R.E., Janssen, S., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Porter, C.H., Rosenzweig, R., Wheeler, T.R. (2016) ***Brief history of agricultural systems modeling.*** *Agricultural Systems*, 155, 240–254.

Kaghazchi, A., Shahdany, S.M., Roozbahani, A. (2021) ***Simulation and evaluation of agricultural water distribution and delivery systems with a Hybrid Bayesian network model,*** *Agricultural Water Management,* 245, 106578.

Kaim, A., Cord, A.F., Volk, M. (2018) ***A review of multi-criteria optimization techniques for agricultural land use allocation.*** *Environmental Modelling & Software*, 105, 79-93.

Kamilaris, A., Prenafeta-Boldú, F. X. (2018) ***Deep learning in agriculture: A survey.*** *Computer and Electronics in Agriculture*, 147, 70-90.

Kamilaris, A., Fonts, A., Prenafeta-Boldú, F. X. (2019) ***The rise of blockchain technology in agriculture and food supply chains,*** *Trends in Food Science & Technology*, 91, 640-652.

Karim, F., Majumdar, S., Darabi, H., Harford, S. (2019) ***Multivariate LSTM-FCNs for Time Series Classification,*** *Neural Networks,* 116, 237–245.

Karlsson, I., Papapetrou, P., Boström, H. (2016) ***Generalized Random Shapelet Forests,*** *Data Mining and Knowledge Discovery,* 30(5), 1053–1085.

Knight, C.H. (2020) ***Review: Sensor techniques in ruminants: more than fitness trackers.*** *Animal*, 14 (S1), s187-s195.

Krid, M., Benamar, F., Lenain, R. (2017) ***A new explicit dynamic path tracking controller using generalized predictive control***. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 15(1), 303-314.

Kubicek, P., Kozel, J., Stampach, R., Lukas, V. (2013) ***Prototyping the visualization of geographic and sensor data for agriculture.*** *Computers and Electronics in Agriculture,* 97, 83–91.

Kumar, R., Sinhg, J. (2003) ***Regional water management modeling for decision support in irrigated agriculture.*** *Journal of irrigation and drainage engineering*. 129 (6), 432-439.

Lambert, M.J., Sibiry Traoré, P.C., Blaes, X., Baret, P., Defourny, P. (2018) ***Estimating smallholder crops production at village level from Sentinel-2 time series in Mali's cotton belt.*** *Remote Sensing of Environment*, 216, 647.

Léger, B., Naud, O. (2009) ***Experimenting statecharts for multiple experts knowledge elicitation in agriculture.*** *Expert Systems with Applications*, 36(8), 11296-11303.

Li, J., Jiao, X., Jiang, H., Song, J., Chen, L. (2020) ***Optimization of Irrigation Scheduling for Maize in an Arid Oasis Based on Simulation–Optimization Model.*** *Agronomy, 10 (7), 935.*. https://doi.org/10.3390/agronomy10070935.

Li, L., Li, X., Chong, C., Wang, C.-H., Wang, X. (2020) ***A decision support framework for the design and operation of sustainable urban farming systems,*** *Journal of Cleaner Production*, 268, 121928.

Li, M., Fu. Q., Singh, V.P., Liu, D., Li, T. (2019) ***Stochastic multi-objective modeling for optimization of water-food-energy nexus of irrigated agriculture,*** *Advances in Water Resources*, 127, 209-224.

Lin, Y.P., Petway, J.R., Johnathen, A., Mukhtar, H., Liao, S.W., Chou, C.F., Ho, Y.F. (2017) ***Blockchain: The Evolutionary Next Step for ICT E-Agriculture,*** *Environments 4*, no. 3: 50.

S.M., Lee, S.I. (2017) ***A Unified Approach to Interpreting Model Predictions.*** NIPS, 4765-4774.

Manson, S., Jordan, N., Nelson, K., Brummel, R. (2016) ***Modeling the effect of social networks on adoption of multifunctional agriculture,*** *Environmental Modelling & Software*, 75, 388-401, ISSN 1364-8152.

Maqrot, S., de Givry, S., Quesnel, G., Tchamitchian, M. (2017) ***A Mixed Integer Programming Reformulation of the Mixed Fruit-Vegetable Crop Allocation Problem.*** In *30th International Conference on Industrial, Engineering, and Other Applications of Applied Intelligent Systems (IEA/AIE)*, 12 pages, Arras, France.

Martin, G., Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., Duru, M. A. (2011) ***Simulation framework for the design of grassland-based beef-cattle farms.*** *Environmental Modelling & Software*, 26, 371-385. 2011.

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P. (2004) ***Fondements ontologiques des systèmes pilotés,*** Tech. report, 2004, Rapport Interne UBIA-INRA, Toulouse-Auzeville (dernière version : juin 2012). https://hal.inrae.fr/hal-03153904/file/Ontol-Syst-pilot.pdf.

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P. (2009) ***Modelling and simulating work practices in agriculture. International Journal of Metadata,*** *Semantics and Ontologies*, 4(1-2):42-53.

Martin-Clouaire, R., Rellier, J.-P., Paré, M., Voltz, M., and Biarnès, A. (2016) ***Modelling management practices in viticulture while considering resource limitations:*** *the Dhivine model.* PLoS ONE 11(3), 2016.

Martin-Clouaire, R. (2017) ***Modelling Operational DecisionMaking in Agriculture.*** *Agricultural Sciences*, 8, 527-544.

McKinion, J.M., Lemmon, H.E. (1985) ***Expert Systems for Agriculture. Computers and Electronics in Agriculture***, 1, 31-40.

Memmah, M.M., Lescourret, F., Yao, X., Lavigne, C. (2015) ***Metaheuristics for agricultural land use optimization.*** *A review. Agronomy for Sustainable. Developement*, 35, 975–998.

Mendel, Y.G. (1907) ***Recherche sur des hybrides végétaux.*** *Le bulletin scientifique de la France et de la Belgique*, tome 41, 371-419.

Millot, A., Mathonat, R., Cazabet, R., Boulicaut, J.F. (2020) ***Actionable subgroup discovery and urban farm optimization.*** *International Symposium on Intelligent Data Analysis (IDA). Apr 2020*, Konstanz, *Germany.*

Minet, J., Curnel, Y., Gobin, A., Goffart, J.P., Mélard, F., Tychon, B., Wellens, J., Defourny, P. (2017) ***Crowdsourcing for agricultural applications: A review of uses and opportunities for a farmsourcing approach,*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 126-138.

Minsky, H. P. (1965) ***Ph.D., The Role of Employment Policy,*** *Hyman P. Minsky Archive*. 270.

Moummadi, M., Abidar, R., Medromi, H. (2011) ***Generic model based on constraint programming and multi-agent system for M2M services and agricultural decision support.*** *International Conference on Multimedia Computing and Systems*, pp. 1-6.

Nada, A., Nasr, M., Hazman, M. (2014) ***Irrigation expert system for trees.*** *International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT)*, 3, 170–175.

Ndiaye, S.M. (1999) ***Apprentissage par renforcement en horizon fini: application à la génération de règles pour la Conduite de Culture,*** Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse 3.

O'Leary, D.E. (2008) ***A multilingual knowledge management system: A case study of FAO and WAICENT.*** *Decision Support Systems*, 45 (3), 641-666.

Padhy, N., Satapathy, S.C. (2020) ***Digital Advancement in AgriTech by Using Evolutionary Techniques.*** *In:* Satapathy S., Bhateja V., Mohanty J., Udgata S. (eds) *Smart Intelligent Computing and Applications. Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol 160. *Springer, Singapore.*

Palpanas, T. (2000) ***Knowledge discovery in data warehouses.*** *ACM Sigmod Record 29.3*, 88-100.

Pappu, N., Sarkar, R., Prabhakar, T. V. (2010) ***Agropedia: Humanization of Agricultural Knowledge.*** *IEEE Internet Computing*, 14 (5), 57-59.

Peart, R.M., Curry R.B. (1978) ***Agricultural Systems Modelling and Simulation.*** Marcel Dekker, New York. CRC Press. 728 pages. ISBN 9780367400859.

Picault, S., Huang, Y.L., Sicard, V., Arnoux, S., Beaunée, G., Ezanno, P. (2019) ***EMULSION: Transparent and flexible multiscale stochastic models in human, animal and plant epidemiology.*** *PLOS Computational Biology 15(9)*, e1007342.

Pierpaoli, E., Carlia, G., Pignattia, E., Canavaria, M. (2013) ***Drivers of Precision Agriculture Technologies Adoption:*** *A Literature Review Procedia Technology 8* (2013) 61 – 69 *doi:* 10.1016/j.protcy.2013.11.010.

Plà-Aragonés, L. M. (Editor) (2015) ***Handbook of Operations Research in Agriculture and the Agri-Food Industry.*** *International Series in Operations Research & Management Science book series* (ISOR, volume 224), 464 p.

Plaisant, C. (2004) ***The challenge of information visualization evaluation. In: Proceedings of the Working Conference on Advanced Visual Interfaces,*** *ACM New York, NY, USA*, pp. 109–16.

Pommier, C., Michotey, C., Cornut, G., Roumet, P., Duchêne, E., Flores, R., Lebreton, A., Alaux, M., Durand, S., Kimmel, E., Letellier, T., Merceron, G., Laine, M., Guerche, C., Loaec, M., Steinbach, D., Laporte, M.A., Arnaud, E., Quesneville, H., Adam-Blondon, A.F. (2019) ***Applying FAIR Principles to Plant Phenotypic Data Management in GnpIS.*** *Plant Phenomics 2019*, 1–15.

Reyniers, F. (1996) ***Principes d'une modélisation biophysique des exploitations.*** *In:* Couplage de modèles en agriculture. Reyniers François (ed.), Benoit-Cattin Michel (ed.). CIRAD-CA. Montpellier : CIRAD, 19-21. (Colloques) ISBN 2-87614-255-4 Couplages de modèles en agriculture, Montpellier, France, 14 Juin 1995/15 Juin 1995.

Ribeiro, M.T., Singh, S., Guestrin, C. (2016) ***"Why Should I Trust You?":*** *Explaining the Predictions of Any Classifier.* KDD 1135-1144.

Rio, A., Maurel, Y., Bugni ,Y., Barais, O. (2019) ***Benefits of Energy Management Systems on local energy efficiency, an agricultural case study.*** *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm 2019), Beijing, China*, p1-7.

Roussey, C., Chanet, J.P., Soulignc, V., Bernard, S. (2011) ***Les ontologies en agriculture.*** Instrumentation Mesure Metrologie 16. 55-84.

Roussey, C., Bernard, S., Pinet, F., Reboud, X., Cellier, I., Sivadon, I., Simonneau, A., Bourigault, A.L. (2017) ***A methodology for the publication of agricultural alert bulletins as LOD.*** *Computers and Electronics in Agriculture.* 142, 632-650.

Ruiz-Garcia, L., Lunadei, L. (2011) ***The role of RFID in agriculture: Applications, limitations and challenges.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 79, 42-50.

Sakoe, H., Chiba, S. (1978) ***Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition.*** *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 26(1), 43–49.

Salaun, M.C., Bugeon, J., Fatet, A., Hue, I., Hurtaud, C., Nédellec, C., Vernet, J., Reichstadt, M., Le Bail, P.Y. (2018). ***Un outil au service de la standardisation des bases de données: les ontologies ATOL/EOL.*** Cahier des Cahier des Techniques de l'INRA, INRA, 2018, 93, 1-7.

Salim, C., Mitton, N. (2020) ***K-Predictions Based Data Reduction Approach in WSN for Smart Agriculture.*** *Computing, Springer Verlag*, 103 (3), 509-532..

Schmitt, M., Zhu, X. (2016) ***Data Fusion and Remote Sensing: An ever-growing relationship.*** *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 4(4), 6-23.

Sini, M., Lauser, B., Salokhe, G., Keizer, J., Katz, S. (2008) ***The AGROVOC Concept Server: rationale, goals and usage.*** *Library Review,* 57 (3), 200-212(13).

Soulignac, V., Pinet, F., Lambert, E., Guichard, L., Trouche, L., Aubin, S., (2017) ***GECO, the French Web-based application for knowledge management in agroecology.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 1050-1056.

Spanaki, K., Sivarajah, U., Fakhimi, M., Despoudi, S., Irani, Z. (2021) ***Disruptive technologies in agricultural operations: a systematic review of AI-driven AgriTech research.*** *Ann Oper Res* 308 (2), 1-34.

Stefas, N., Bayram, H., Isler, V. (2019) ***Vision-based monitoring of orchards with UAVs.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 163, 104814.

Street, D. (1990). ***Fisher's Contributions to Agricultural Statistics.*** *Biometrics*, 46(4), 937-945.

Taillandier, P., Vo, D.A., Amouroux, E., Drogoul, A. (2010) ***GAMA: a simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control.*** *International Conference on Principles and Practice of Multi-Agent Systems.* 242-258.

Taghikhah, F., Voinov, A., Shukla, N., Filatova, T., Anufriev, M. (2021) ***Integrated modeling of extended agro-food supply chains: A systems approach,*** *European Journal of Operational Research,* 288 (3), 852-868.

Tonda, A., Boukhelifa, N., Chabin, T., Barnabe, M., Génot, B., Lutton, E., Perrot, N. (2018) ***Interactive Machine Learning for Applications in Food Science.*** *Human and Machine Learning*, 19.

Tourrette, T., Lenain, R., Rouveure, R., Solatges, T. (2017) ***Tracking footprints for agricultural applications: a low cost lidar approach,*** *workshop on Agricultural Robotics,* Vancouver.

Trépos, R., Lemarié, S., Raynal, H., Morison, M., Couture, S., Garcia, F. (2014) ***Apprentissage par renforcement pour l'optimisation de la conduite de culture du colza.*** *Presented at JFPDA'14.* Journées Francophones Planification, Décision, Apprentissage pour la conduite de système, Liège, BEL (2014-05-12 - 2014- 05-13).

Tse, C., Barkema, H., DeVries, T., Rushen, J., Pajor, E. (2018) ***Impact of automatic milking systems on dairy cattle producers' reports of milking labour management, milk production and milk quality.*** *Animal*, 12 (12), 2649–2656.

Varenne, F., Silberstein, M. (2013). ***Modéliser et simuler. Epistémologie pratique de la modélisation et de la simulation.*** Tome 1. Vol. 1. Collection : Sciences & philosophie.

Vespier, U., Knobbe, A.J., Nijssen, S., Vanschoren, J. (2012) ***MDL-Based Analysis of Time Series at Multiple Time-Scales.*** ECML/PKDD (2) 371-386.

Wachowiak, M.P., Walters, D.F., Kovac, J.M., Wachowiak-Smolíková, R. (2017) ***Visual analytics and remote sensing imagery to support community-based research for precision agriculture in emerging areas.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 143, 149-164.

Wolf, P., Ropertz, T., Feldmann, P., Berns, K. (2019) ***Combining Onthologies and Behavior-based Control for Aware Navigation in Challenging Off-road Environments.*** *In ICINCO (2) Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*, Prague, *Czech Republic* (pp. 135-146).

Xiao, G., Calvanese, D., Kontchakov, R., Lembo, D., Poggi, A., Rosati, R., Zakharyaschev, M. (2018) ***Ontology-Based Data Access: A Survey.*** IJCAI, 5511-5519.

Yandun, F. J., Gregorio López, E., Rosell Polo, J. R., Torres-Torriti, M., & Auat Cheein, F. A. (2017) ***Terrain classification using ToF sensors for the enhancement of agricultural machinery traversability.*** *Journal of Terramechanics*, 76 1-13.

Zabala, J., Martínez-Paz, J., Alcon, F. (2021) ***A comprehensive approach for agroecosystem services and disservices valuation,*** *Science of The Total Environment,* 768, 144859.

Zhao, J.C., Zhang, J.U., Feng, Y. and Guo, J.X. (2010) ***The study and application of the IOT technology in agriculture,*** *International Conference on Computer Science and Information Technology*, Chengdu, 462-465.

Zhu, X.X., Tuia, D., Mou, L., Xia, G., Zhang, L., Xu, F., Fraundorfer, F. (2017) ***Deep Learning in Remote Sensing: A Comprehensive Review and List of Resources.*** *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 5 (4), 8-36.

Zeigler, B. P., Praehofer, H. T., Kim, G. (2000) ***Theory of Modeling and Simulation.*** *2nd ed. Orlando, FL, USA: Academic Press.*

Zelinka, I., Snasael, V. and Abraham, A. (Editor) (2013) ***Handbook of Optimization: From Classical to Modern Approach*** (*Intelligent Systems Reference Library*, 38), *Springer*, 1112 p.

CAPÍTULO 4

Adams, M.L., Cook, S.E. (1997) ***Methods of on-farm experimentation using precision agriculture technology*** *– American Society of Agricultural Engineers 1, Proceedings of the 1997 ASAE Annual International Meeting. Part 1, Minneapolis (MN, USA) 10-14 August 1997;* Code *48254*; 10p.

Altieri, M.A. (1989) ***Agroecology: A new research and development paradigm for world agriculture Agriculture, Ecosystems & Environment,*** 27 (1–4), 37-46.

Altieri, M.A., Funes-Monzote, F.R., Petersen, P. (2012) ***Agroecologically Efficient Agricultural Systems for Smallholder Farmers: Contributions to Food Sovereignty.*** *Agronomy for Sustainable Development*, 32, 1–13.

Anderson, C. (2012) ***Makers : la nouvelle révolution industrielle,*** Paris, Pearson, 309 p.

ANRT (2018) ***Pour une politique industrielle du numérique,*** Livre blanc. 56 p. disponible sur politique-industrielle-numerique_futuris-anrt-web.pdf.

Antle, J.M., Basso, B., Conant, R.T., Godfray, H.C.J., Jones, J.W., Herrero, M., Howitt, R.E., Keating, B.A., Munoz-Carpena, R., Rosenzweig, C., Tittonell, P., Wheeler, T.R. (2017) ***Towards a new generation of agricultural system data, models and knowledge products: Design and improvement.*** *Agricultural Systems 155*, 255–268.

Banque Mondiale, 2019, ***Future of Food: Harnessing Digital Technologies to Improve Food System Outcomes.*** *World Bank, Washington, DC*, 44 pages. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/31565.

Barreteau, O. (2003) ***Our companion modelling approach.*** *Journal of Artificial Societies and Social Simulation.* 6 (2), 8 p.

Bécu, N., Neef, A., Schreinemachers, P., Sangkapitux, C. (2008) ***Participatory computer simulation to support collective decision-making: potential and limits of stakeholder involvement.*** *Land Use Policy*, 25 (4), 498-509.

Bellon-Maurel, V., Huyghe, C. (2016) ***L'innovation technologique dans l'agriculture.*** Géoéconomie 80 – mai/juin 2016, 159-180.

Bellon-Maurel, V., Neveu, P., Termier, A., Garcia, F. (2018) ***Le*** **Big Data** ***en agriculture.*** Annales des Mines – Enjeux numériques 2, 77-81.

Bellon-Maurel, V., Short, M.D., Roux, P., Schulz, M., Peters, G.M. (2014) ***Streamlining life cycle inventory data generation in agriculture using traceability data and information and communication technologies*** *– Part I: Concepts and technical basis, Journal of Cleaner Production*, 69, 60-66.

Bellon-Maurel, V., Peters, G., Clermidy, S., Frizarin, G., Sinfort, C., Ojeda, H., Roux, P., Short, M. (2015) ***Streamlining life cycle inventory data generation in agriculture using traceability data and information and communication technologies Part II:*** *Application to viticulture. Journal of Cleaner Production.* 87 (1), 119-129.

Benjamin, M., Yik, S. (2019) ***Precision livestock farming in swine welfare: a review for swine practitioners.*** *Animals*, 9, 133.

Bentley, J.W., Van Mele, P., Barres, N.F., Okry, F., Wanvoeke, J. (2019) ***Smallholders download and share videos from the Internet to learn about sustainable agriculture.*** *International Journal of Agricultural Sustainability*, 17 (1), 92-107.

Bergez, J.-E., Soulignac, V., Pinet, F., Gobert, J. (2016) ***Workshop 4.3: ICT to help on participatory approaches for the agroecological transition of agriculture, in Social and Technological Transformation of Farming Systems: Diverging and Converging Pathways.*** *Proceedings of the 12th European IFSA Symposium, 12th - 15th July 2016 at Harper Adams University, United Kingdom*, Volume 2, Andrew Wilcox and Karen Mills (Eds.).

Bergez, J.-E., Therond, O.(2019) Introduction in Bergez, J.-E., Audouin, E., Therond, O., Eds. (2019) ***Agroecological Transitions: From Theory to Practice in Local Participatory Design,*** *Springer (Open)*, https://doi.org/10.1007/978-3-030-01953-2_1, 335 pp., pp 3-12.

Bioteau, T., Béline, F., Laurent, F., Girault, R., Tretyakov, O., Boret, F., Balynska, M. (2013) ***Analyse spatialisée pour l'aide à la planification des projets de méthanisation collective,*** Sciences Eaux & Territoires 3 (12), 34-41.

Biradar, C.M., Ghosh, S., Löw, F., Singh, R., Chandna, P., Sarker, A., Sahoo, R.N., Swain, N., Choudhury, G., Agrawal, S., Rizvi, N., El-Shamaa, K., Atassi, L., Dong, J., Gaur, A., Wery, J. (2019) ***Geo*** **big data** ***and digital augmentation for accelerating agroecological intensification in drylands.*** *2019 ISPRS-GEOGLAM-ISRS Joint International Workshop on Earth Observations for Agricultural Monitoring; New Delhi (India)* 18-20 Feb 2019, 42 (*Issue 3*/W6) 545-548. *Code* 150236.

Bonnet, P., Faye, E., Roche, M. (2019). ***Éviter une valorisation technologique et économique asymétrique des*** **big data.** Wageningen: SPORE, CTA, 2 pages. https://spore.cta.int/fr/opinions/article/eviter-une-valorisation-technologique-et-economique-asymetrique-des-big-data-sid0726bd8f1-b891-47fc-8993-87861c5806dd.

Bonny, S. (2017). ***High-tech agriculture or agroecology for tomorrow's agriculture?*** *Harvard College Review of Environment & Society*, 2017, 4 (*Spring 2017*), pp.28-34.

Brydegaard, M., Gebru, A., Svanberg S. (2014) ***Super Resolution Laser Radar with Blinking Atmospheric Particles — Application to Interacting Flying Insects.*** **Progress** *In Electromagnetics Research*, 147, 141–151.

Calvet-Mir, L., Benyei, P., Aceituno-Mata, L., Pardo-de-Santayana, M., López-García, D., Carrascosa-García, M., Perdomo-Molina, A., Reyes-García, V. (2018) ***The contribution of traditional agroecological knowledge as a digital commons to agroecological transitions: The case of the CONECT-e platform.*** *Sustainability (Switzerland) 10* (9), 3214.

Caquet, T., Gascuel, C., Tixier-Boichard, M. Eds. (2020) ***Agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires.*** Ed Quae, Collection : Matière à débattre et décider, 104 p.

Chastant-Maillard, S., Saint-Dizier, M. (2016) ***Élevage de précision.*** Éditions La France Agricole, Paris, 270 p.

Chowdhary, G., Gazzola, M., Krishnan, G., Soman, C., Lovell, S. (2019) ***Soft Robotics as an Enabling Technology for Agroforestry Practice and Research.*** *Sustainability*, 11, 6751.

Claquin, P., Martin, A., Deram, C., Bidaud, F., Delgoulet, E., Gassie, J., Hérault, B. (2017) ***MOND'Alim 2030, panorama prospectif de la mondialisation des systèmes alimentaires,*** Paris, La Documentation française, 228 p.

Cloet, E., Brocard, V., Lessire, F., Guiocheau, S. (2017) ***Maximizing grazing with a mobile milking robot. In Precision Livestock Farming*** '17, 28-34. Disponible sur demande à: https://orbi.uliege.be/handle/2268/229020.

Cook, S., Cock, J., Oberthür T., Fisher, M. (2013) ***On farm experimentation.*** *Better Crops/Vol. 97* (4), pp.16-20.

Deichmann, U., Goyal, A., Mishra, D. (2016) ***Will Digital Technologies Transform Agriculture in Developing Countries ?*** *Policy Research Working Paper;No. 7669. World Bank, Washington, DC. © World Bank.* https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/24507.

De Leeuw, J., Vrieling, A., Shee, A., Atzberger, C., Hadgu, M.K., Biradar, M.C., Keah, H., Turvey, C. (2014) ***The potential and uptake of remote sensing in insurance: a review.*** *Remote Sensors*, 6, 10888-10912.

Della Chiesa, S., la Cecilia, D., Genova, G., Balotti, A., Thalheimer, M., Tappeiner U., Niedrist, G. (2019) ***Farmers as data sources: Cooperative framework for mapping soil properties for permanent crops in South Tyrol*** (*Northern Italy*). Geoderma, (342), 93-105.

Dhiab, H., Labarthe, P., Laurent, C. (2020). ***How the performance rationales of organisations providing farm advice explain persistent difficulties in addressing societal goals in agriculture.*** *Food Policy*, 101914.

Di Salvo, C. (2014) ***Critical Making as Materializing the Politics of Design.*** *The Information Society*, 30, 96–105.

Divya, B., Santhi, M. (2019) ***SVM-based pest classification in agriculture field.*** *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7 (5) 150-155.

Duru, M., Therond, O., Fares, M. (2015) ***Designing agroecological transitions: a review.*** *Agron Sustain Dev. 35*, 1237–1257.

El Hassane, A., Kadiri, Z., Kuper, M., Quarouch, H. (2015) ***Composer avec l'État : voies d'engagement des jeunes diplômés dans l'agriculture au Maroc.*** Cahiers de l'Agriculture, 24 (6), 356-36.2.

Elijah, O., Rahman, T.A., Orikumhi, I., Leow, C.Y., Hindia, M.N. (2018) ***An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges.*** *IEEE Internet of Things Journal*, 5 (5), 3758-3773.

Enkel, E., Bogers, M., Chesbrough, H. (2020) ***Exploring open innovation in the digital age: A maturity model and future research directions.*** *R and D Management*, *50* (1), 161-168.

Falconnier, G.N., Descheemaeker, K., Mourik, T.A.V., Giller, K.E., (2016) ***Unravelling the causes of variability in crop yields and treatment responses for better tailoring of options for sustainable intensification in southern Mali.*** *Field Crops Res.* 187, 113–126.

FAO (2020). ***Realizing the potential of digitalization to improve the agri-food system: Proposing a new International Digital Council for Food and Agriculture.*** *A concept note. IT Division.* Rome, *Food and Agriculture Organization of the United Nations.*

Fielke, S. J., Garrard, R., Jakku, E., Fleming, A., Wiseman, L., & Taylor, B. M. (2019) ***Conceptualising the DAIS: Implications of the "Digitalisation of Agricultural Innovation Systems" on technology and policy at multiple levels.*** *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100296.

Fielke, S., Taylor, B., & Jakku, E. (2020) ***Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review.*** *Agricultural Systems*, 180, 102763.

Fountas, S., Carli, G., Sorensen, C. G., Tsiropoulos, Z., Cavalaris, C., Vatsanidou, A., Liakos, B., Canavari, M., Wiebensohn, J., Tisseyre, B. (2015) ***Farm management information systems: Current situation and future perspectives.*** *Computers and electronics in agriculture*, 115, 40-50.

Fournel, S., Rousseau, A.N., Laberge B. (2017) ***Rethinking environment control strategy of confined animal housing systems through precision livestock farming.*** *Biosystems Engineering*, 155, 96-123.

Galliano, D., Orozco, L. (2011) ***The determinants of electronic traceability adoption: a firm-level analysis of French agribusiness.*** *Agribusiness*, Wiley, 27 (3), 379-397.

Gardner, T.A., Benzi, M., Börner, J., Dawkins, E., Fick, S., Garrett, R., Godar, J., Grimard, A., Lake, S., Larsen, R.K., Mardas, N., Dermott, C.L.M., Meyfroidt, P., Osbeck, M., Persson, M., Sembres, T., Suavet, C., Strassburg, B., Wolvekamp, P. (2019) ***Transparency and sustainability in global commodity supply chains.*** *World Development*, 121, 163-177.

Ghahari, A., Newlands, N.K., Lyubchich, V., Gel, Y.R. (2019) ***Deep Learning at the Interface of Agricultural Insurance Risk and Spatio-Temporal Uncertainty in Weather Extremes.*** *North American Actuarial Journal*, 23 (4) 535-550.

Gopalakrishnan, P. K., Behdad, S. (2019) ***A Conceptual Framework for Using Videogrammetry in Blockchain Platforms for Food Supply Chain Traceability.*** *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, 59223, 12..

Grieve, B.D., Duckett, T., Collison, M., Boyd, L., West, J., Yin, H., Arvin, F., Pearson, S. (2019) ***The challenges posed by global broadacre crops in delivering smart agri-robotic solutions: A fundamental rethink is required.*** *Global Food Security*, 23, 116-124.

Groot, J.C.J., Jellema, A., Rossing, W.A.H. (2010) ***Designing a hedgerow network in a multifunctional agricultural landscape: balancing trade-offs among ecological quality, landscape character and implementation costs.*** *European. Journal of Agronomy*, 32 (1) 112-119.

Groot, J.C.J., Oomen, G.J.M., Rossing, W.A.H. (2012) ***Multi-objective optimization and design of farming systems.*** *Agricultural Systems*, 110, 63-77.

Labarthe, P. (2009) ***Extension services and multifunctional agriculture. Lessons learnt from the French and Dutch contexts and approaches.*** *Journal of environmental management*, 90, S193-S202.

Halachmi, I., Guarino, M., Bewley, J.,Pastell, M. (2019) ***Smart Animal Agriculture: Application of real-time sensors to improve animal well-being and production,*** Annual *Review of Animal Biosciences*, 7, 403-425.

Ingrand, S. (2018) ***Opinion paper: "monitoring te salutant": combining digital sciences and agro-ecology to design multi-performant livestock farming systems.*** *Animal 12*, 2–3.

IPES-Food (2016) ***De l'uniformité et la diversité : Changer de paradigme pour passer de l'agriculture industrielle à des systèmes agroécologiques diversifiés.*** Rapport, Frison E.A. Eds., 110 p. http://www.ipes-food.org/_img/upload/files/UniformityToDiversity_FULL.pdf.

Jiménez, D., Pérez-Uribe, A., Satizábal, H., Barreto, M., Van Damme, P., Tomassini, M. (2008) ***A survey of artificial neural network-based modeling in agroecology.*** *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 226, 247-269.

Johannes, A., Picon, A., Alvarez-Gila, A., Echazarra, J., Rodriguez-Vaamonde, S., Navajas, A.D., Ortiz-Barredo, A. (2017) ***Automatic plant disease diagnosis using mobile capture devices, applied on a wheat use case,*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 138, 200-209.

Jouanjean, M.A. (2019) ***Digital opportunities for trade in the agriculture and food sectors. OECD Food,*** *Agriculture and Fisheries 122.*

Kadish, D., Dulic, A. (2015) ***Crafting sustainability: approaching wicked environmental problems through high–low tech practice.*** *Digital Creativity 26(1)*, 65-81.

Klerkx, L., Jakku, E., Labarthe, P. (2019) ***A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda, NJAS*** – *Wageningen Journal of Life Sciences 90-91, nr* 100315.

Klerkx, L., Rose, D. (2020) ***Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?*** *Global Food Security, 24, nr 100347.*

Knight, C.H. (2020) ***Review: Sensor techniques in ruminants: more than fitness trackers.*** *Animal,* 14 (S1), s187-s195.

Kos, D., Kloppenburg, S. (2019) ***Digital technologies, hyper-transparency and smallholder farmer inclusion in global value chains.*** *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 41, 56-63.

Leclère, M., Loyce, C., Jeuffroy, M.-H. (2018) ***Growing camelina as a second crop in France: a participatory design approach to produce actionable knowledge.*** *European Journal of Agronomy*, 101, 78–89.

Leibovici, P.E. (2015) ***La plate-forme, nouvelle frontière de l'économie.*** *Les Echos* 12 Nov 2015. Acc le 10 Aout 2020 sur https://www.lesechos.fr/2015/11/la-plate-forme-nouvelle-frontiere-de-leconomie-280276.

Lemeilleur, S., Allaire, G. (2020) ***Système participatif de garantie dans les labels du mouvement de l'agriculture biologiques. Une réappropriation des communs intellectuels,*** *Économie Rurale*, 365, Juillet-septembre, 7-26.

Lepenioti, K., Bousdekis, A., Apostolou, D., Mentzas, G. (2020) ***Prescriptive analytics: Literature review and research challenges.*** *International Journal of Information Management, 50,* 57–70.

Leveau, L., Bénel, A., Cahier, J.P., Pinet, F., Salembier, P., Soulignac, V., Bergez, J.E. (2019) ***Information and Communication Technology (ICT) and the Agroecological Transition.*** **In Bergez, J.-E., Audouin, E., Therond, O., Eds. (2019)** ***Agroecological Transitions: From Theory to Practice in Local Participatory Design,*** *Springer*, https://doi.org/10.1007/978-3-030-01953-2_1, 335 pp.

Li, N., Ren, Z., Li, D., Zeng, L. (2020) ***Review: Automated techniques for monitoring the behaviour and welfare of broilers and laying hens: Towards the goal of precision livestock farming.*** *Animal*, 14 (3), 617-625.

Lixi, M., Dahan, M. (2014) ***ICT as an Enabler of Transformation in Ethiopia.*** *World Bank, Washington, DC. © World Bank* https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/20076.

López, O., Martinez, M., Migallon, H., Malumbres, M., Bonastre, A., Serrano, J.J. (2012) ***Monitoring Pest Insect Traps by Means of Low-Power Image Sensor Technologies,*** *Sensors*, 12(11), 15801-15819.

Lowder, S. K., J. Skoet, et al. (2016) ***The Number, Size, and Distribution of Farms, Smallholder Farms, and Family Farms Worldwide.*** *World Development*, 87, 16-29.

Luvisi, A. (2016) ***Electronic identification technology for agriculture, plant, and food. A review.*** *Agronomy for sustainable development*, 36 (1), 1-14.

Mattia, C.M., Lovell, S.T., Davis, A. (2018) ***Identifying barriers and motivators for adoption of multifunctional perennial cropping systems by landowners in the Upper Sangamon River Watershed, Illinois.*** *Agroforestry Systems. 92(5)*, 1155-1169.

Messmer, J.G. (2013) ***Les circuits courts multiacteurs : émergence d'organisations innovantes dans les filières courtes alimentaires.*** Rapport INRA – MaR/S, 669p.

Meynard, J.-M. (2017) ***Agroecology, a new relationship to knowledge and innovation, OCL - Oilseeds and fats,*** *Crops and Lipids*, 24 (3), *Article number D303.*

Miah, J.H., Griffiths, A., McNeill, R., Halvorson, S. , Schenker, U., Espinoza-Orias, N., Morse, S. , Yang, A.D. (2018) ***A framework for increasing the availability of life cylce inventory data-based on the role of multinational companies.*** *International Journal of Life Cycle Analysis*, 23 (9), 1744-1760.

Milgroom, J., Bruil J., De Leeuwis C. (2016) ***Co-creation in the practice, science and movement of agroecology.*** *Farming Matters 32:6–8*, disponible à https://www.ileia.org/2016/03/23/editorial-co-creation-practice-science-movement-agroecology/.

Mol, A. P. J., Oosterveer, P. (2015) ***Certification of markets, markets of certificates: Tracing sustainability in global agro-food value chains.*** *Sustainability (Switzerland), 7(9)*, 12258–12278.

Molden, D. (2007) ***Water for Food, Water for Life: A Comprehensive Assessment of Water Management in agriculture.*** *International Water Management Institute, Earthscan, London*, 645 pp.

Moura, D.J., Silva, W.T., Naas, I.A., Tolón, Y.A., Lima, K.A.O., Vale, M.M. (2008) ***Real time computer stress monitoring of piglets using vocalization analysis.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 64 (1), 11-18.

Mul, M.F., Ploegaert, J.P.M., George, D.R., Meerburg, B.G., Dicke, M., Groot Koerkamp, P.W.G. (2016) ***Structured design of an automated monitoring tool for pest species.*** *Biosystems Engineering*, 151, 126-140.

Neethirajan, S. (2017) ***Recent advances in wearable sensors for animal health management.*** *Sensing and Bio-Sensing Research*, 12, 15-29.

OCDE (2011) ***Payer pour la biodiversité : améliorer l'efficacité coût des paiements pour services écosystémiques,*** Éditions OCDE, https://www.oecd.org/fr/env/ressources/46900333.pdf.

Panten, K., Bramley, R.G.V., Lark, R.M., Bishop, T.F.A. (2010) ***Enhancing the value of field experimentation through whole-of-block designs.*** *Precision Agriculture*, 11 (2) 198-213.

Pesche, D., Losch, B. Imbernon, J. (dir.) (2016) ***Une nouvelle ruralité émergente. Regards croisés sur les transformations rurales africaines.*** Atlas pour le Programme Rural Futures du NEPAD, deuxième édition revue et augmentée, Montpellier, Cirad, NEPAD, 76 p.

Pham, X., Stack, M. (2018) ***How data analytics is transforming agriculture.*** *Business Horizons*, 61(1) 125-133.

Piepho, H.-P., Richter, C., Spilke, J., Hartung, K., Kunick, A., Thöle, H. (2011) ***Statistical aspects of on-farm experimentation.*** *Crop and Pasture Science*, 62 (9) 721-735.

Pingali, P.L. (2012). ***Green revolution: impacts, limits, and the path ahead.*** *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A, 109 (31)*, 12302–12308.

Prada, R., Prendinger, H., Yongyuth, P., Nakasoneb, A., Kawtrakulc, A. (2014) ***AgriVillage: A game to foster awareness of the environmental impact of agriculture,*** *Computers in Entertainment 12(2)*, 1-18.

Rao, K.N. (2010) ***Index based crop insurance.*** *Agriculture and Agricultural Science Procedia*, 1, 193-203.

Reckling, M., Bergkvist, G., Watson, C.A., Stoddard, F.L., Bachinger, J. (2020) ***Re-designing organic grain legume cropping systems using systems agronomy.*** *European Journal of Agronomy*, 112.

Renting, H., Oostindie, H., Laurent, C., Brunori, G., Barjolle, D., Jervell, A., Granberg, L., Heinonen, M. (2008) ***Multifunctionality of agricultural activities, changing rural identities and new institutional arrangements.*** *International Journal of Agricultural Resources, Governance and Ecology*, 7(4), 361-385.

Reynolds, D., Baret, F., Welcker, C., Bostrom, A., Ball, J., Cellini, F., Lorence, A., Chawade, A. Khafif, M., Noshita, K., Mueller-Linow, M., Zhou, J., Tardieu, F. (2019) ***What is cost-efficient phenotyping? Optimizing costs for different scenarios.*** *Plant Science,* Elsevier, 282, 14-22.

Rey-Valette, H., Pinto, M., Maurel, P., Chia, E., Guiheneuf, P.Y., Michel, L., Nougaredes, B., Soulard, C., Jarrige, F., Guillemot, C., Mate, M.S., Ollagnon, H., Delorme, G., Prouheze, N., Laurent, A., Suita, L.A., Bertrand, J., Dieudonne, C., Champorigaud, A., Barbe, E. (2011) ***Guide pour la mise en œuvre de la gouvernance en appui au développement durable des territoires,*** Montpellier, INRA Éditions. 155pp.

Rieutort, L. (2009) ***Dynamique rurales françaises et re-territorialisation de l'agriculture,*** *L'information géographique*, 73, 30-48.

Rotz, S., Duncan, E., Small, M., Botschner, J., Dara, R., Mosby, I., Reed, M., Fraser, E.D.G. (2019) ***The Politics of Digital Agricultural Technologies: A Preliminary Review.*** *Sociologia Ruralis*, 59 (2), 203-229.

Rowe, E., Stamp Dawkins, M., Gebhardt-Henrich, S.G. (2019) ***A systematic review of precision livestock farming in the poultry sector: is technology focussed on improving bird welfare?*** *Animals*, 9, 614.

Sharma Ghimire, P., Tripathee, L., Chen, P., Kang, S. (2019) ***Linking the conventional and emerging detection techniques for ambient bioaerosols: a review.*** *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 18(3), 495-523.

Schmidt, P., Möhring, J., Koch, R.J., Piepho, H.-P. (2018) ***More, larger, simpler: how comparable are on-farm and on-station trials for cultivar evaluation ?*** *Crop Sciences, 58*, 1508–1518.

Schnebelin, E., Labarthe, P., Touzard J.M. (2021). ***How digitalisation interacts with ecologisation? Perspectives from actors of the French Agricultural Innovation System.*** *J. of Rural Studies,* 46, 599-610.

Schultz, A., Wieland, R., Lutze, G. (2000) ***Neural networks in agroecological modelling - Stylish application or helpful tool ?*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 29 (1-2) 73-97.

Seaborn, K., Fels, D.I. (2015) ***Gamification in theory and action: A survey;*** *International Journal of Human Computer Studies*, 74, 14-31.

Shalloo, L., O'Donovan, M., Leso, L., Wener, J., Ruelle, E., Geoghegan, A., Delaby, L., O'Leary, N. (2018) ***Review: Grass-based dairy systems, data and precision technologies.*** *Animal*, 12 (S2), 262-271.

Speelman, E.N., García-Barrios, L.E., Groot, J.C.J., Tittonell, P. (2014) ***Gaming for smallholder participation in the design of more sustainable agricultural landscapes,*** *Agricultural Systems*, 126, 62-75.

Tirole, J. (2016) ***Économie du bien commun, Chap. 14 Quand le digital modifie la chaîne de valeur,*** Paris, PUF.

Tixier, P., Peyrard, N., Aubertot, J.-N., Gaba, S., Radoszycki, J., Caron-Lormier, G., Vinatier, F., Mollot, G., Sabbadin, R. (2013) ***Modelling interaction networks for enhanced ecosystem services in agroecosystems.*** *Advances in Ecological Research 49*, 437-480.

Tsan, M., Totapally, S., Hailu, M., Addom, B.K. (2019) ***The Digitalisation of African Agriculture Report,*** 2018-2019, CTA, https://www.cta.int/en/digitalisation/issue/the-digitalisation-of-african-agriculture-report-2018-2019-sid0d88610e2-d24e-4d6a-8257-455b43cf5ed6.

Tullo, E., Borgonovo, F., Grilli, G., Micheletti, A., Aletti, G., Lolli, S., Guarino, V.F.M. (2018) ***Application of an early warning to detect enteropathies in intensive broiler farming.*** *In:10th International Livestock Environment Symposium, ILES 2018; Omaha (United States)*, 25-27 September 2018, p. 2-6. https://doi.org/10.13031/iles.ILES18-073.

Van der Burg, S., Bogaardt, M.-J., Wolfert, S. (2019) ***Ethics of smart farming: current questions and directions for responsible innovation towards the future.*** *Njas -Wageningen J. Life Sci.* 90-91, 100289.

Van Hirtum, A., Berckmans, D. (2004) ***Objective recognition of cough sound as a biomarker for aerial pollutants.*** *Indoor Air 14*, 10–15.

Vanloqueren, G., Baret, P. (2009) ***How agricultural research systems shape a technological regime that develops genetic engineering but locks out agroecological innovations.*** *Research Policy*, 38, 971–983.

Vasconez, J.P., Kantor, G.A., Auat Cheein, F.A. (2019) ***Human–robot interaction in agriculture: A survey and current challenges.*** *Biosystems Engineering 179*, 35-48.

Veissier, I., Kling-Eveillard, F., Mialon, M.-M., Silberberg, M., De Boyer des Roches, A., Terlouw, C., Ledoux, D., Meunier, B., Hostiou, N. (2019) ***Élevage de précision et bien-être en élevage : la révolution numérique de l'agriculture permettra-t-elle de prendre en compte les besoins des animaux et des éleveurs.*** INRA Productions Animales, 32 (2), 281-290.

Vrieling, A., Meroni, M., Shee, A., Mude, A.G., Woodard, J., de Bie, C.A.J.M. (2014) ***Historical extension of operational NDVI products for livestock insurance in Kenya.*** *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf. 28*, 238–251.

Vroege, W., Dalhaus, T., Finger, R. (2019) ***Index insurances for grasslands – A review for Europe and North-America.*** *Agricultural Systems*, 168, 101-111.

Wegener, J.K., Urso, L.M., von Hörsten, D., Minßen, T.F., Gaus, C.G. (2017) ***Developing new cropping systems – which innovative techniques are required?*** *Landtechnik,* 72(2), 91–100.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M.J. (2017) Big Data *in smart farming–a review.* *Agricultural Systems*, 153, 69-80.

Wyckhuys, K.A.G., Bentley, J.W., Lie, R., Nghiem, L.T.P., Fredrix, M. (2018) *Maximizing farm-level uptake and diffusion of biological control innovations in today's digital era.* *BioControl,* 63 (1) 133-148.

Xin, H., Liu, K. (2017) *Precision livestock farming in egg production.* *Animals Frontiers,* 27 (1), 24-31.

CAPÍTULO 5

Allen, T. F. H., Tainter, J. A., & Hoekstra, T. W. (1999) *Supply-Side Sustainability.* *Systems Research and Behavioral Science,* 16(5), 403–427.

Arthur, WB. (1994) *Increasing returns and path dependence in the economy.* Ann Arbor, *Michigan: University of Michigan Press (Economics, Cognition, and Society)*, 224 p.

Blandin, M.-C. (2016) *100 millions de téléphones portables usagés : l'urgence d'une stratégie.* Rapport d'information n° 850 (2015-2016), mission d'information du Sénat.

Bos, J., Bovenkerk, B., Feindt, P., Dam, Y. (2018) *The Quantified Animal: Precision Livestock Farming and the Ethical Implications of Objectification.* *Food Ethics. 2.*

Bouissou, J. et Albert, E. (2021) *Bois, cuivre, puces électroniques... La planète touchée par une pénurie de biens.* *Le Monde*, 14 mai 2021.

Boullier, D. (2019) *Sociologie du numérique.* Paris : Armand Colin.

Bournigal, J.-M. (2014) *Définir ensemble le futur du secteur des agroéquipements.* Rapport de la mission Agroéquipements.

Bowler (1986) *Intensification, concentration and specialisation in agriculture: the case of the European Community.* *Geography 71 (1)*, 14-24.

Bronson, K., Knezevic, I. (2016) Big Data *in food and agriculture.* Big Data *& Society,* 3(1), 1-5.

Brue, S. L. (1993) *Retrospectives: The Law of Diminishing Returns.* *Journal of Economic Perspectives*, 7(3), 185–192.

Burton, R. J., Riley, M. (2018) ***Traditional Ecological Knowledge from the internet? The case of hay meadows in Europe.*** *Land Use Policy,* 70, 334-346.

Busse, M., Schwerdtner, W., Siebert, R., Doernberg, A., Kuntosch, A., König, B., Bokelmann, W. (2015) ***Analysis of animal monitoring technologies in Germany from an innovation system perspective.*** *Agricultural Systems*, 138, 55-65.

Carbonell, I. (2016) ***The ethics of*** **big data** ***in big agriculture.*** *Internet Policy Review*, 5(1), 1-13.

Carolan, M. (2020) ***Acting like an algorithm: digital farming platforms and the trajectories they (need not) lock-in.*** *Agriculture and Human Values*, 37 (4), 1041-1053.

Chambaz, G. (2019) ***The Evolutionary Dynamics of Societies: Critical Synthesis of the Work of J.A. Tainter et al. On Sustainability, Collapse, Resilience and Energy Transitions, Master's thesis.*** Université de Lausanne.

Clap, J., Ruder, S.-L. (2020) ***Precision Technologies for Agriculture: Digital Farming, Gene-Edited Crops, and the Politics of Sustainability*** **Global** ***Environmental*** **Politics,** 20 (3), 49–69.

David, P. (1985) ***Clio and the Economics of QWERTY.*** *The American Economic Review, Vol. 75, No. 2, Papers and Proceedings of the Ninety-Seventh Annual Meeting of the American Economic Association*, 332-337.

Deléage, E. (2013) ***Agricultures à l'épreuve de la modernisation.*** Paris, Éditions Quæ, « Synthèses », 95 p.

Delannoy, L., Longaretti, P.-Y., Murphy, D. et Prados, E. (2021). ***Peak oil and the low-carbon energy transition: a net energy perspective.*** *Applied Energy*, Elsevier, 304, 1-17..

Dhar, P. (2021) ***Cybersecurity Report: "Smart Farms" Are Hackable Farms,*** *in IEEE Spectrum – Risk Factor, March 15.* https://spectrum.ieee.org/riskfactor/telecom/security/cybersecurity-report-how-smart-farming-can-be-hacked.

Elhefnawy, N. (2004) ***Societal Complexity and Diminishing Returns in Security.*** *International Security*, 29(1), 152–174.

Elhefnawy, N. (2008) ***A Long-Term Trend Toward the Depletion of Fiscal-Macroeconomic Slack in the World Economy?*** *(SSRN Scholarly Paper ID 3182381). Social Science Research Network.*

Ellul, J. (1977) ***Le Système technicien.*** Paris, Calmann-Lévy.

Fielke, S., Taylor, B., Jakku, E. (2020) ***Digitalisation of agricultural knowledge and advice networks: A state-of-the-art review.*** *Agricultural Systems*, 180, 102763.

Gupta, M., Abdelsalam, M., Khorsandroo, S., Mittal, S. (2020) ***Security and Privacy in Smart Farming: Challenges and Opportunities,*** *IEEE Access, 8,* 34564-34584.

Isaac, H., Pouyat, M. (2015) ***Les défis de l'agriculture connectée dans une société numérique. 16 propositions pour repenser la production, la distribution et la consommation alimentaires à l'ère du numérique.*** Livre Blanc Renaissance Numérique.

Javelle, A., Kazic, D., Tassin, J. (2021) ***Introduction au dossier Repenser Le Statut Des Plantes, La pensée écologique,*** Presses Universitaires de France.

Klerkx, L., Jakku, E., Labarthe, P. (2019) ***A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda.*** *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90.

Labarthe, P. (2010) ***Services immatériels et verrouillage technologique. Le cas du conseil technique aux agriculteurs.*** *Économies et sociétés*, 44(2), 173-96.

Lagneaux, S., Servais, O. (2014) ***De la traite robotisée au raid d'avatars. Incorporation et virtualisation.*** *Parcours anthropologiques*, 9, 73-101.

Larrère, C., Larrère, R. (1997) ***« Le contrat domestique »,*** *Le courrier de l'environnement*, n° 30 http://www7.inra.fr/dpenv/larrec30.htm.

Longuet, G. (2019) ***Le devoir de souveraineté numérique,*** Rapport fait au nom de la commission d'enquête du Sénat, n° 7 tome I (2019-2020).

Marquet, K., Combaz, J., Berthoud, F. (2019) ***Introduction aux impacts environnementaux du numérique.*** 1024, bulletin de la Société Informatique de France, 85-97.

Meuret, M., Tichit, M., Hostiou, N. (2013) ***Élevage et pâturage « de précision » : l'animal sous surveillance électronique.*** Courrier de l'environnement de l'INRA (63): 13–24.

Meynard, J.-M., Charrier, F., Fares, M., Le Bail, M., Magrini, M.B., Charlier, A., Messéan, A. (2018) ***Socio-technical lock-in hinders crop diversification in France.*** *Agronomy for Sustainable Development. 38*, 54.

Miles, C. (2019) ***The combine will tell the truth: On precision agriculture and algorithmic rationality.*** Big Data *& Society, 6(1).*

Mundler, P., Labarthe, P., Laurent, C. (2006) ***Les disparités d'accès au conseil. Le cas de la région Rhône-Alpes.*** Économie rurale. Agricultures, alimentations, territoires, (291), 26-41.

Pitron, G. (2018) ***La guerre des métaux rares. La face cachée de la transition énergétique et numérique.*** *Les Liens qui Libèrent*, 296 p.

Rotz, S., Gravely, E., Mosby, I., Duncan, E., Finnis, E., Horgan, M., Fraser, E. (2019) ***Automated pastures and the digital divide: How agricultural technologies are shaping labour and rural communities.*** *Journal of Rural Studies*, 68, 112-122.

Schneider, I. (2020) ***Democratic Governance of Digital Platforms and Artificial Intelligence? Exploring Governance Models of China, the US, the EU and Mexico.*** JeDEM 12(1), 1-24.

Servigne, P. (2014) ***Nourrir l'Europe en temps de crise : Vers des systèmes alimentaires résilients.*** *Nature et progrès.*

Stiegler, B. (2015) ***La Société automatique : 1. L'avenir du travail,*** Fayard, 300 p.

Tainter, J. A. (1990) ***The Collapse of Complex Societies,*** *Cambridge University Press.*

Tainter, J. A. (2009) ***Complexity, collapse, and sustainable problem-solving. In K. W. Hippel (Ed.), Conflict Resolution*** Vol. 2, pp. 349–390. *Eolss Publishers.*

Tainter, J. A., Patzek, T. W. (2012) ***Drilling down: The Gulf oil debacle and our energy dilemma.*** *Copernicus Books and Springer Science+Business Media.*

Tainter, J. A. (2016) ***Agriculture and the energy-complexity spiral.*** *Behavioral and Brain Sciences,* 39, 37–38.

Wolf, S. A., Buttel, F. H. (1996) ***The political economy of precision farming.*** *American Journal of Agricultural Economics*, 78(5), 1269-1274.

CAPÍTULO 6

Académie des technologies (2021) ***Innovation dans les industries alimentaires : impacts de la révolution numérique.*** Rapport de l'académie des technologies, Paris, 110p.

Ahumada, O., Villalobos, J.R. (2009) ***Application of planning models in the agri-food supply chain: a review.*** *European Journal of Operational Research*, 196(1), 1–20.

Ahumada, O., Villalobos, J.R., Nicholas Mason, A. (2012) ***Tactical planning of the production and distribution of fresh agricultural products under uncertainty.*** *Agricultural Systems*, 112, 17-26.

Anderies, J.M., Mathias, J.D., Janssen M.A. (2019) ***Knowledge infrastructure and safe operating spaces in social–ecological systems.*** *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116 (12), 5277-5284.

ANRT (2018) ***Pour une politique industrielle du numérique,*** Livre blanc. 56 p. disponible sur politique-industrielle-numerique_futuris-anrt-web.pdf.

Arora, A., Athreye, S., Huang, C. (2016) ***The paradox of openness revisited: collaborative innovation and patenting by UK innovators.*** *Research Policy*, 45, 1352-1361.

Aubin, J.P. (1991) ***Viability Theory.*** *Birhaüser, Boston.*

Balaji Prabhu, B.V., Dakshayini, M. (2020) ***An effective multiple linear regression-based forecasting model for demand-based constructive farming.*** *International Journal of Web-Based Learning and Teaching Technologies,* 15 (2), 1-18.

Bergez, J.-E., Audouin, E., Therond, O., Eds. (2019) ***Agroecological Transitions: From Theory to Practice in Local Participatory Design,*** *Springer*, 335 pp. https://doi.org/10.1007/978-3-030-01953-2_1.

Berti, G., Mulligan, C. (2016) ***Competitiveness of Small Farms and Innovative Food Supply Chains: The Role of Food Hubs. Creating Sustainable Regional and Local Food Systems.*** *Sustainability*, 8 (7), 616, https://doi.org/10.3390/su8070616.

Besnard, P., Hunter, A. (2008) ***Elements of argumentation.*** *Cambridge: MIT press, 47..*

Biggs, R., Schlüter, M., Schoon, M.L. (2015) ***Principles for Building Resilience: Sustaining Ecosystem Services in Social–Ecological Systems.*** *Cambridge University Press*, 390.

Boukhelifa, N., Duke, D.J. (2009) ***Uncertainty visualization: why might it fail?*** CHI EA '09: CHI '09 *Extended Abstracts on Human Factors in Computing SystemsApril 2009* pp. 4051–4056.

Brandt, F., Conitzer, V., Endriss, U., Lang, J., Procaccia, A.D. (Eds.) (2016) ***Handbook of computational social choice.*** *Cambridge University Press.*

Brias, A. (2016) ***Conjurer la malédiction de la dimension dans le calcul du noyau de viabilité à l'aide de parallélisation sur carte graphique et de la théorie de la fiabilité : application à des dynamiques environnementales.*** Thèse Irstea-LISC, soutenue en décembre 2016 à l'Université Clermont Auvergne.

Bronson, K. (2019). ***Looking through a responsible innovation lens at uneven engagements with digital farming.*** *NJAS – Wageningen Journal of Life Science*, 90–91, 100294.

Bronson, K., Knezevic, I. (2016) Big Data ***in food and agriculture.*** Big Data *& Society*, 3 (1), 1-5.

Caquet, T., Gascuel, C., Tixier-Boichard, M. (2020) ***Agroécologie : des recherches pour la transition des filières et des territoires.*** Éd Quae, Collection : Matière à débattre et décider, 104 p.

Carolan, M. (2017). ***Publicising food:*** **big data*, precision agriculture, and coexperimental techniques of addition.*** *Sociologia Ruralis*, 57(2), 135-154.

Carolan, M. (2018) ***'Smart' farming techniques as political ontology: Access, sovereignty and the performance of neoliberal and not so neoliberal worlds.*** *Sociologia ruralis*, 58(4), 745-764.

Charvat, K., Charvat Junior, K., Řezník, T., Lukas, V., Jedlička, K., Palma, R., Berzins, R. (2018) ***Advanced Visualisation of Big Data for Agriculture as Part of Databio Development,*** IGARSS 2018 - 2018 *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Valencia*, 2018, pp. 415-418. *doi:* 10.1109/IGARSS.2018.8517556.

Courtonne, J.Y., Alapetite, J., Longaretti, P.Y., Dupré, D., Prados, E. (2015) ***Downscaling material flow analysis: The case of the cereal supply chain in France.*** *Ecological Economics*, 118, 67-80.

Crespo, O., Bergez, J., Garcia, F. (2010) ***Multiobjective optimization subject to uncertainty: application to irrigation strategy management.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 74, 145–154.

De Leeuw, J., Vrieling, A., Shee, A., Atzberger, C., Hadgu, M.K., Biradar, M.C., Keah, H., Turvey, C. (2014) ***The potential and uptake of remote sensing in insurance: a review.*** *Remote Sensors*, 6, 10888-10912.

Dominiak, K.N., Kristensen, A.R. (2017) ***Prioritizing alarms from sensor-based detection models in livestock production - A review on model performance and alarm reducing methods.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 133, 46-67.

Dumont, B., Groot, J.C.J., Tichit, M. (2018) ***Review: Make ruminants green again – how can sustainable intensification and agroecology converge for a better future?*** *Animal*, 12(s2), S210-S219.

Eastwood, C., Klerkx, L., Ayre, M., Dela Rue, B. (2019) ***Managing socioethical challenges in the development of smart farming: from a fragmented to a comprehensive approach for responsible research and innovation.*** *Journal of Agricultural and Environmental Ethics*, 32 (5-6), 741-768.

Ellis, J.L., Jacobs, M., Dijkstra, J., van Laar, H., Cant, J.P., Tulpan, D., Ferguson, N. (2020) ***Review: Synergy between mechanistic modelling and data-driven models for modern animal production systems in the era of*** **big data.** *Animal*, 14 (S2), s223-s237.

Enkel, E., Bogers, M., Chesbrough, H. (2020) ***Exploring open innovation in the digital age: A maturity model and future research directions.*** *R and D Management,* 50 (1), 161-168.

Fekete, J.D., Fisher, D., Nandi, A., Sedlmair, M. (2019) ***Progressive Data Analysis and Visualization (Dagstuhl Seminar 18411).*** *Dagstuhl Reports.* https://drops.dagstuhl.de/opus/volltexte/2019/10346/

Fielke, S.J., Garrard, R., Jakku, E., Fleming, A., Wiseman, L., Taylor, B.M. (2019). ***Conceptualising the DAIS: Implications of the 'Digitalisation of Agricultural Innovation Systems' on technology and policy at multiple levels.*** *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100296.

Gardner, T.A., Benzi, M., Börner, J., Dawkins, E., Fick, S., Garrett, R., Godar, J., Grimard, A., Lake, S., Larsen, R.K., Mardas, N., Dermott, C.L.M., Meyfroidt, P., Osbeck, M., Persson, M., Sembres, T., Suavet, C., Strassburg, B., Wolvekamp, P. (2019) ***Transparency and sustainability in global commodity supply chains.*** *World Development*, 121, 163-177.

Ghahari, A., Newlands, N.K., Lyubchich, V., Gel, Y.R. (2019) ***Deep Learning at the Interface of Agricultural Insurance Risk and Spatio-Temporal Uncertainty in Weather Extremes.*** *North American Actuarial Journal*, 23 (4), 535-550.

Groot, J.C.J., Oomen, G.J.M., Rossing, W.A.H. (2012) ***Multi-objective optimization and design of farming systems.*** *Agricultural Systems*, 110, 63-77.

Hansen, B. G., Stræte, E. P. (2020) ***Dairy farmers' job satisfaction and the influence of automatic milking systems.*** *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 92, 100328.

Hill, A., Lucet, E., Lenain, R., Laneurit, J. (2019) ***Neuroevolution with CMA-ES for real-time gain tuning of a car-like robot controller.*** *Proceedings of the 16th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics* (ICINCO 2019), pp. 311-319.

Husnjak, S., Perakovića, D., van Forenbacher, I., Mumdziev M. (2015) ***Telematics System in Usage Based Motor Insurance,*** *Procedia Engineering*, 100, 816-825.

Ingrand, S. (2018) ***Opinion paper: 'monitoring te salutant:' combining digital sciences and agro-ecology to design multi-performant livestock farming systems.*** *Animal*, 12, 2–3.

Inria (2019) ***Cybersecurity: Current challenges and Inria's research directions,*** 168 p, Inria, Le Chesnay, France.

Jakku, E., Taylor, B., Fleming, A., Mason, C., Fielke, S., Sounness, C., Thorburn, P. (2019) ***"If they don't tell us what they do with it, why would we trust them?" Trust, transparency and benefit-sharing in Smart Farming.*** *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100285.

Klerkx L., Rose D. (2020) ***Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?*** *Global Food Security*, 24, 100347.

Klerkx, L., Jakku, E., Labarthe, P. (2019) ***A review of social science on digital agriculture, smart farming and agriculture 4.0: New contributions and a future research agenda,*** *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*, 90-91, 100315.

Kilgour, D. M., Eden, C. (Eds.) (2010) ***Handbook of group decision and negotiation.*** *Springer Science & Business Media, 4.*

Laneurit, J., Chapuis, R., Debain, C. (2016) ***TRACKBOD, an accurate, robust and low cost system for mobile robot person following.*** MCG 2016 – *5th International Conference on Machine Control & Guidance "Facing complex outdoor challenges by inter-disciplinary research"* Vichy, France, *October 5-6th*, 2016, 6 p. Accessible sur https://mcg2016.irstea.fr/wp-content/uploads/2017/05/MCG2016_paper_31.pdf.

Lepenioti, K., Bousdekis, A., Apostolou, D., Mentzas, G. (2020) ***Prescriptive analytics: Literature review and research challenges.*** *International Journal of Information Management,* 50, 57–70.

Li, J., Rodriguez, D., Zhang, D., Ma, K. (2015) ***Crop rotation model for contract farming with constraints on similar profits.*** *Computers and Electronics in Agriculture*, 119, 12-18.

Melkonyan, A., Gruchmann, T., Lohmar, F., Kamath, V., Spinler, S. (2020) ***Sustainability assessment of last-mile logistics and distribution strategies: The case of local food networks.*** *International Journal of Production Economics*, 228, 107746.

Morin, E. (2014) ***Introduction à la pensée complexe,*** Éditions du Seuil, « Points essais » n°534.

Owen, R., Macnaghten, P., Stilgoe, J. (2012) ***Responsible research and innovation: from science in society to science for society, with society.*** *Science and Public Policy*, 39(6), 751–760.

Pellé, S., Reber, B. (2015) ***Responsible innovation in the light of moral responsibility.*** *Journal on Chain and Network Science*, 15(2), 107-117.

Potter K., Rosen P., Johnson C.R. (2012) ***From Quantification to Visualization: A Taxonomy of Uncertainty Visualization Approaches.*** *In: Dienstfrey A.M., Boisvert R.F. (eds) Uncertainty Quantification in Scientific Computing. WoCoUQ 2011. IFIP Advances in Information and Communication Technology, vol 377. Springer, Berlin, Heidelberg,* pp. 226-249.

Rey-Valette, H., Pinto, M., Maurel, P., Chia, E., Guiheneuf, P.Y., Michel, L., Nougaredes, B., Soulard, C., Jarrige, F., Guillemot, S.C., Mate, M.S., Ollagnon, H., Delorme, G., Prouheze, N., Laurent, A., Suita, L.A., Bertrand, J., Dieudonné, C., Champorigaud, A., Barbe, E. (2011) ***Guide pour la mise en œuvre de la gouvernance en appui au développement durable des territoires.*** Montpellier, INRA Editions. 155 p.

Rose, D.C., Chilvers, J. (2018) ***Agriculture 4.0: broadening responsible innovation in an Era of smart farming.*** *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2, 87.

Ryschawy, J., Moraine, M., Péquignot, M., Martin, G. (2019) ***Trade-offs among individual and collective performances related to crop–livestock integration among farms: a case study in southwestern France.*** *Organic Agriculture*, 9(4), 399-416.

Stilgoe, J., Owen, R., Macnaghten, P. (2013) ***Developing a framework for responsible innovation.*** *Research Policy*, 42, 1568– 1580.

Sutherland, L. A., Mills, J., Ingram, J., Burton, R. J., Dwyer, J., Blackstock, K. (2013) ***Considering the source: Commercialisation and trust in agri-environmental information and advisory services in England.*** *Journal of environmental management,* 118, 96-105.

Svetlin, I., Makatsoris, H., Jreissat, M., Wagner, C. (2016) ***Linking human and machine - towards consumer-driven automated manufacturing.*** *Proceedings. of 2016 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Vancouver, CN*, pp 1789-1796.

Tesfaye, A., Hansen, J., Kassie, G.T., Radeny, M., Solomon, D. (2019) ***Estimating the economic value of climate services for strengthening resilience of smallholder farmers to climate risks in Ethiopia: A choice experiment approach.*** *Ecological Economics,* 162, 157-168.

Tisseyre, B., McBratney, A.B. (2008) ***A technical opportunity index based on mathematical morphology for site-specific management: An application to viticulture.*** *Precision Agriculture*, 9 (1-2), 101-113.

Trnka, M., Eitzinger, J., Kapler, P., Dubrovský, M., Semerádová, D., Žalud, Z., Formayer, H. (2007) ***Effect of estimated daily global solar radiation data on the results of crop growth models.*** *Sensors*, 7 (10), 2330-2362.

Trompette, P., Vinck, D. (2009) ***Retour sur la notion d'objet-frontière.*** *Revue d'anthropologie des connaissances*, 3(1), 5-27.

Vik, J., Stræte, E. P., Hansen, B. G., Nærland, T. (2019) ***The political robot–The structural consequences of automated milking systems (AMS) in Norway.*** *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences*, 90, 100305.

Vinck, D. (1999) ***Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique. Contribution à la prise en compte des objets dans les dynamiques sociales.*** *Revue Française de Sociologie*, XI, 385-414.

Wiseman, L., Sanderson, J., Zhang, A., Jakku, E. (2019) ***Farmers and their data:***

An examination of farmers' reluctance to share their data through the lens of the laws impacting smart farming. *NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences,* 90, 100301.

Wolf, S.A., Buttel, F.H. (1996) ***The political economy of precision farming.*** *American Journal of Agricultural Economics,* 78(5), 1269-1274.

Wolfert, S., Ge, L., Verdouw, C., Bogaardt, M.J. (2017) Big Data *in Smart Farming* – *A review.* *Agricultural Systems,* 153, 69-80.

Wu, X., Aravecchia, S., Pradalier, C. (2019) ***Design and implementation of computer vision based in-row weeding system.*** 2019 *International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2019, p. 4218–4224.

Glosario

- **ANRT:** Asociación Nacional de Investigación y Tecnología de Francia
- **AOC:** Denominación de origen controlada
- **CAP:** Política Agrícola Común
- **CATI:** Centro de Procesamiento de Datos Automatizado
- **CITEPA:** Centro Técnico de Referencia para la Contaminación Atmosférica y el Cambio Climático
- **DAS:** Sistema de apoyo a la toma de decisiones
- **DBMS:** Sistema de gestión de bases de datos
- **DGE:** Dirección General de Empresas
- **DSS:** *Decision Support System*
- **ERP:** Enterprise Resource Planning (Planificación de los recursos de la empresa)
- **ETSI:** *European Telecommunications Standards Institute*
- **FAO:** *Food and Agriculture Organization* - Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura
- **FNSEA:** Federación Nacional de Sindicatos de Agricultores de Francia
- **RGPD:** Reglamento General de Protección de Datos
- **GEI:** Gas de efecto invernadero
- **GIS:** Sistemas de Información Geográfica
- **GPS:** Sistema de posicionamiento global
- **HCI:** *Human-Computer Interaction* (Interacción Humano-Computadora)
- **HLPE:** *High Level Panel of Experts* (ONU)
- **I■ CT:** Information and Communication Technology
- **INRAE:** French National Research Institute for Agriculture, Food, and Environment

Inria: French national research institute for digital science and technology

- **IoT:** Internet of Things

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

- **ITU:** IT University of Copenhagen
- **JA:** French Young Farmers' Union
- **MIT:** Massachusetts Institute of Technology
- **NGO:** Non-Governmental Organisation
- **OECD:** Organisation for Economic Cooperation and Development
- **OIE:** World Organisation for Animal Health (formerly Office International des Epizooties)
- **OLAP:** On Line Analytical Processing
- **ONF:** French National Forestry Office
- **OWL:** Web Ontology Language
- **PDO:** Protected Designation of Origin
- **PEPR:** Priority Equipment Programme for Research
- **PES:** Payment for Ecosystem Services
- **PGS:** Participatory Guarantee System
- **RDA:** Research Data Alliance
- **RFID:** Radio Frequency Identification
- **RRI:** Responsible Research and Innovation
- **SADEA:** Sustainable agricultural systems and agricultural equipment contributing to the ecological transition
- **SAREF:** Smart Applications Reference ontology
- **UE:** Experimental Unit
- **UMR:** Mixed Research Unit
- **UMT:** Mixed Technology Unit
- **UN:** Unidad mixta tecnológica
- **UNESCO:** Organización de las Naciones Unidas por la educación, la ciencia y la cultura
- **WEEE:** *Waste Electrical And Electronic Equipment*
- **W3C:** *World Wide Web Consortium*

Equipos-proyecto de Inria

https://www.inria.fr/en/list-of-project-teams

Unidades de investigación de INRAE

https://annuaire.inrae.fr/accueil.action#ongletStructure

- **UMR AGROECOLOGY :** https://www6.dijon.inrae.fr/umragroecologie_eng/
- **UMR BAGAP :** https://www6.rennes.inrae.fr/bagap_eng/
- **UMR BIOEPAR :** https://www6.angers-nantes.inrae.fr/bioepar_eng/
- **UMR BOA :** https://web.univ-tours.fr/umr-0083-biologie-des-oiseaux-et-aviculture-boa
- **UMR CBGP :** https://www6.montpellier.inrae.fr/cbgp_eng/
- **UMR GENPHYSE :** https://genphyse.toulouse.inra.fr
- **UMR MISTEA :** https://www6.montpellier.inrae.fr/mistea_eng/
- **UMR MOSAR :** https://www6.jouy.inrae.fr/mosar_eng/
- **UMR PEGASE :** https://www6.rennes.inrae.fr/pegase_eng/
- **UMR SAS :** https://www6.rennes.inrae.fr/umrsas_eng/
- **UMR SELMET :** https://umr-selmet.cirad.fr
- **UMR SMART LERECO :** https://www6.inrae.fr/umt-stratege/Partenaires/INRAE/UMR-1302-SMART-LERECO
- **UMR Tetis :** https://umr-tetis.fr/index.php/fr/
- **UMR TOXALIM :** https://www6.toulouse.inrae.fr/toxalim_eng/
- **UMR UMRH :** https://umrh-bioinfo.clermont.inrae.fr/Intranet/web/UMRH/en

© Inria - 10/2022

Domaine de Voluceau, Rocquencourt BP 105
78153 Le Chesnay Cedex, France
Tel.: +33 (0)1 39 63 55 11
www.inria.fr