

Web-based epidemiological surveillance systems and applications to coffee rust disease

Sistemas de vigilancia epidemiológicos para interfaz web y aplicaciones en roya del cafeto

Gustavo Mora-Aguilera*, ^{1,2,3}Programa de Postgrado en Fitosanidad-Fitopatología, Gerardo Acevedo-Sánchez, Eduardo Guzmán-Hernández, Oscar Eder Flores-Colorado, Juan José Coria-Contreras, Coral Mendoza-Ramos, Verónica Inés Martínez-Bustamante, ²Laboratorio de Análisis de Riesgo Epidemiológico Fitosanitario (CP-LANREF); Abel López-Buenfil ³Colegio de Postgraduados (CP), Campus Montecillo, km 36.5 Carretera México-Texcoco. Montecillo, Estado de México, C.P. 56230; Rigoberto González-Gómez, Miguel Ángel Javier-López, DGSV-SENASICA km 37.5 Carretera Federal México-Pachuca, Calle Centenario, Tecámac, Estado de México C.P. 55740. *Autor para correspondencia: morag@colpos.mx.

Recibido: 30 de Abril, 2021.

Aceptado: 10 de Agosto, 2021.

Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Guzmán-Hernández E, Flores-Colorado OE, Coria-Contreras JJ, Mendoza-Ramos C, Martínez-Bustamante VI, López-Buenfil A, González-Gómez R and Javier-López MA. 2021. Web-based epidemiological surveillance systems and applications to coffee rust disease. Mexican Journal of Phytopathology 39(3): 452-492.

DOI: <https://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.2104-6>

Primera publicación DOI: 31 de Agosto, 2021.

First DOI publication: Agosto 31, 2021.

Resumen. El avance de la tecnología digital ha permitido concebir Sistemas de Vigilancia Epidemiológicos (SVE) automatizados con un enfoque *holístico-sistémico* favoreciendo la planeación, operación, gestión y procesamiento de datos fitosanitarios de manera efectiva y oportuna para toma de decisiones en la prevención y manejo regional

Abstract. The advancement of digital technology has made it possible to conceive automated Epidemiological Surveillance Systems (ESS) with a *holistic-systemic* approach allowing effective operation, management, and processing of phytosanitary data for fast decision-making applied to regional prevention and pest management. This surveillance type focuses on plant health, overcoming the reductionist pest vision of the conventional normative surveillance. An ESS implies the precise definition of the regional framework, objectives, pest(s) in wide-sense, human/financial resources, regulatory context, support research planning, operational structure, and innovation models. These elements determine the precision, frequency, and type of sampling and monitoring and the selection of variables related to a novel *epidemiological system*. In contrast to the normative surveillance, a systemic ESS has descriptive and risk forecasting

de plagas. Este tipo de sistemas se enfocan en la salud del cultivo superando la visión reduccionista de plaga en la vigilancia normativa convencional. Un SVE web implica la definición clara del marco regional, objetivos, plaga(s) en su amplia acepción, recursos humanos/financieros, contexto normativo, líneas de investigación de soporte, estructura operativa y modelos de innovación. Estos elementos determinan la precisión, frecuencia y tipo de muestreo y monitoreo, así como las variables de medición relativas a un novel *sistema epidemiológico*. A diferencia de la vigilancia normativa, un SVE web *holístico-sistémico* tiene capacidad descriptiva y de pronóstico de riesgos, incluyendo alertas tempranas a partir de análisis espaciales y temporales. La interfaz web SVE asegura la generación flexible y dinámica de reportes y/o análisis automatizados. Un SVE operado en plataformas web, con énfasis en lenguajes de programación y herramientas de uso libre puede ser alojado en servidores genéricos o dedicados para almacenamiento de metadatos configurados con tecnologías Linux/Apache y funcionalidad 24/7 (h día⁻¹). Programas de uso libre incluyen MySQL/MariaDB y otros como gestores de bases de datos; PHP / Node.js, y JavaScript, Ajax, HTML5 y CSS, como tecnologías web de maquetado base ‘back-end’ y ‘front-end’, respectivamente. Esta revisión se enfoca en principios, atributos conceptuales, enfoques metodológicos generales y objetivos de SVE base web. Aplicaciones generales se ilustran con un SVE desarrollado en México para el café (*Coffea* spp.), el cual permitió operar la vigilancia de 19 plagas, nueve con estatus cuarentenario, mediante la generación, gestión y análisis de 87.4 y 15.7 millones de registros climáticos y epidemiológicos, respectivamente, obtenidos entre 2013-2019.

Palabras clave: *Hemileia vastatrix*, *Coffea arabica*, Alerta temprana, Prevención.

capabilities, including early warnings, based on spatial and temporal analyses. A web-based ESS assures a flexible-dynamic generation of reports and automated analysis. An ESS operated on web platforms, emphasizing open source software and tools, can be hosted on generic or dedicated servers for metadata storage configured with Linux / Apache technologies with 24/7 (h day⁻¹) functional capabilities. Open source tools include MySQL / MariaDB and other systems as database managers; PHP / Node.js, and JavaScript, Ajax, HTML5 and CSS as web design base ‘back-end’ and ‘front-end’ programs, respectively. This review focuses on principles, conceptual attributes, general methodological approaches, and objectives of web-based ESS. An overview is presented with an ESS developed in Mexico for coffee plantations (*Coffea* spp.), which allowed the surveillance of 19 pests, nine under quarantine status, through the generation, management, and analysis of 87.4 million climatic data and 15.7 million epidemiological records over 2013-2019.

Key words: *Hemileia vastatrix*, *Coffea arabica*, Early warning, Prevention.

The concept and scope of epidemiological surveillance

Epidemiological surveillance (ES) embraces a phytosanitary concept referred to planned actions that aim to prevent and mitigate the effect of epidemics by restricting the entry, establishment, and/or population density increase of a pest(s) in an area of exclusion or endemicity, to avoid or reduce continued productive impacts that compromise the sustainability and resilience of a crop (Mora-Aguilera *et al.*, 2014b). This definition has three implications: 1) ES’s ruling principles are protection and prevention, the

El concepto y ámbito de vigilancia epidemiológica

La *vigilancia epidemiológica* (VE) es una acción fitosanitaria planeada que tiene como objetivo la prevención y mitigación del efecto de epidemias mediante la restricción del ingreso, establecimiento y/o incremento poblacional de una plaga(s) en un área de exclusión o endemidad, con el fin de evitar o reducir impactos productivos sostenidos que comprometan la sustentabilidad y resiliencia de un cultivo (Mora-Aguilera *et al.*, 2014b). Esta definición tiene tres implicaciones: 1) La VE tiene como principios la *prevención*, constituida a su vez por estrategias secuenciales de *exclusión* y *erradicación*, y la *protección*. Esto implica que la VE es aplicable tanto a organismos de interés cuarentenario como de importancia económica prevalentes; 2) La VE tiene como propósito el monitoreo de riesgos epidémicos. En consecuencia, un *novel sistema epidemiológico* es su marco racional obligado (Figura 1). Trasciende la reducida concepción de '*Vigilancia*', definida en la Norma Internacional de Medidas Fitosanitarias 5 (NIMF 5), publicada por la Convención Internacional de Protección Fitosanitaria (CIPF), adscrita a la FAO (<https://www.ippc.int/es/>), como: '*Un proceso oficial para recopilar y registrar información sobre la presencia o ausencia de una plaga mediante el uso de encuestas, monitoreo u otros procedimientos*', la cual implica una estrategia limitada a monitorear un organismo-plaga fuera de su contexto epidémico; 3) La VE puede incorporar cualquier atributo biótico y/o abiótico (p.e., nutrición y aeropoluentes) pertinente a la salud de una población de plantas, es decir, el cultivo (Mora-Aguilera *et al.*, 2016a). Adicionalmente, la plaga en su amplia acepción (patógenos, insectos, malezas, etc.) es la unidad biológica poblacional de interés (Mora-Aguilera *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d), liberándolo-

latter constituted in turn by sequential strategies of exclusion and eradication. This implies that ES applies to both organisms of quarantine interest and those regionally prevalent of economic importance; 2) The purpose of ES is to monitor epidemic risks. Consequently, a novel epidemiological system is its compelling rational framework (Figure 1). It transcends the narrow concept of 'Surveillance', defined in the International Standards for Phytosanitary Measures 5 (ISPM 5), published by the International Plant Protection Convention (IPPC), bounded to FAO (<https://www.ippc.int/es/>). This is defined as: '*An official process to collect and record information on the presence or absence of a pest through the use of surveys, monitoring or other procedures*', which implies a strategy limited to monitoring a pest-organism outside of its epidemic context; 3). ES can incorporate any biotic and/or abiotic attribute (e.g., nutrition and air pollutants) relevant to the health of a plant population, that is, the crop (Mora-Aguilera *et al.*, 2016a). Additionally, the pest in its broad sense (pathogens, insects, weeds, etc.) is the population biological unit of interest (Mora-Aguilera *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d), freeing itself from the infection principle typical of classical epidemiology and still deep-rooted on conventional surveillance (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017). Eventually, ES transcends the population to incorporate the community as a comprehensive analytical, biological base (Mora-Aguilera *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d). This approach represents a paradigm shift in classical epidemiology. Other meanings of ES, in general, restrict the biological scope to a taxonomically related pest(s) (Kaundal *et al.*, 2006). The rational epidemiological framework is not explicit, it is omitted in the strategy (Firanj Sremac *et al.*, 2018), or its scope is limited to reporting the presence and absence of a pest (ES type 1) or stratified by levels

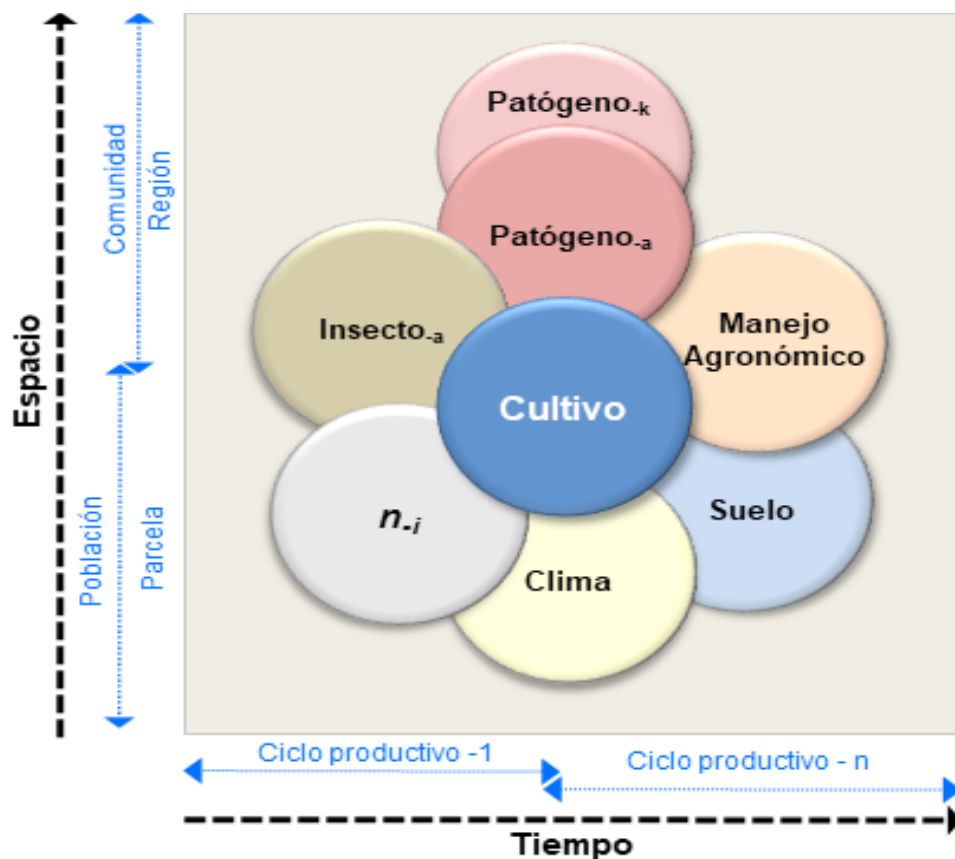


Figura 1. Nueva propuesta de *sistema epidemiológico*, en el cual la planta es el centro del sistema y subordina el resto de subsistemas a diferentes escalas de *tiempo* y *espacio*. El *sistema epidemiológico* es flexible para incluir *n*-subsistemas (p.e., vector) y permite la aplicación *holística-sistémica* de los principios de *prevención* y *protección* del manejo de plagas. Este sistema sustituye el restrictivo triángulo y tetraedro epidemiológico. El *sistema epidemiológico* es intrínsecamente *sistémico* y su implementación en *vigilancia epidemiológica* conduce al enfoque *holístico* con la inclusión dinámica e interactiva de *n*-plagas (patógenos, insectos, ácaros, etc.) evaluadas en su macro y microambientes regional-parcelario (Figura 4 y 6), transitando del enfoque de *población* de la epidemiología clásica al de *comunidad*.

Figure 1. Novel *epidemiology system* in which the *plant* subordinates the remaining subsystems at different *time* and *space* scales. The proposed system is flexible to include *n*-subsystems (e.g., vector) and allows the *holistic-systemic* application of the pest management *prevention* and *protection* principles. This system replaces the restricted *epidemiological triangle* and *tetrahedron*. The *epidemiology system* is intrinsically *systemic* and its implementation lead towards a *holistic* approach with the dynamic and interactive inclusion of *n*-pests (pathogens, insects, mites, etc.) assessed in their macro and micro-environment niche (Figure 4 and 6), transiting from the *population* of classical epidemiology to the *community*.

se del principio de infección, propio de la epidemiología clásica, fuertemente adoptado por la vigilancia convencional (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017). Eventualmente, se supera la *población* para incorporar la *comunidad* como base biológica analítica integral (Mora-Aguilera *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d). Este enfoque representa un cambio de paradigma en la epidemiología clásica.

Otras acepciones de la VE, en general restringen el ámbito biológico a una plaga(s) taxonómicamente relacionada(s) (Kaundal *et al.*, 2006), el marco epidemiológico racional no es explícito o se omite en la estrategia (Firanj Sremac *et al.*, 2018), y su alcance se limita al reporte presencia/ausencia de una plaga (VE tipo 1) o estratifica por niveles de detección (VE tipo 2) (Cuadro 1) (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017).

of detection (ES type 2) (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017) (Table 1).

Recent experiences have shown that ES type 3, to which the proposed definition adheres, involves a complex and dynamic implementation of technical-scientific, operational, and digital innovation strategies (Kaundal *et al.*, 2006). Under this approach, its systemic application at time and space scales that guarantee the solution of a phytosanitary problem lead to the development of *Epidemiological Surveillance Systems* (ESS), which often are referred to as *Epidemiological Surveillance Programs* in the context of public policies. The system approach is natural because its conception and operation are based on the *epidemiological system* in its modern, flexible structure and dynamic n_i -subsystems, the plant population as an integrative *subsystem*, and

Cuadro 1. Tipos de vigilancia epidemiológica (VE) fitosanitaria propuestos en función de su objetivo, enfoque metodológico y principio fitosanitario enfatizado ejemplificados con algunos Programas de VE.

Table 1. Types of phytosanitary epidemiological surveillance (EV) proposed according to their objective, methodological approach and emphasized phytosanitary principle, exemplified with some EV Programs.

Tipo VE	Objetivo / Metodología	Principio Fitosanitario	² Ejemplos de Programas de VE operados en un entorno web
Tipo 1	Estatus de plaga: Área libre Área de Baja prevalencia / Análisis cualitativo con adherencia a NIMF 6 y 8	Exclusión	<ul style="list-style-type: none"> • DGSV/CNRF, https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF • EPPO, https://gd.eppo.int/ • NAPPO, https://www.pestalerts.org • OIRSA, https://geoportal.oirsa.org/
Tipo 2	Delimitación y contención regional / Análisis cuantitativo descriptivo	Exclusión Erradicación	<ul style="list-style-type: none"> • DGSV/CNRF/SIRVEF https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF • SIMDIA http://www.siafeson.com/simdia
Tipo 3	Estatus de plaga, Delimitación regional, Riesgos epidémicos, Alertas y criterios de accionabilidad Dispositivos de emergencia Campaña fitosanitaria / Análisis cuantitativo descriptivo e inferencial	Exclusión Erradicación Protección	<ul style="list-style-type: none"> • ANACAFE https://www.anacafe.org/Servicios/Cedicafe • FUNDECITRUS https://www.fundecitrus.com.br/alerta-fitosanitario • Fundación ABC https://fundacaoabc.org/ • PVEF-Cafeto https://www.lanref.royacafe.org.mx • SIVEA-Agave https://www.sivea.org.mx

²Los hipervínculos de algunos programas de VE podrían no ser funcionales o públicos en concordancia con políticas operativas de la institución respectiva. / ²Links of some ES Programs cannot be fully functional or allow public access according to institutional operative policies.

Experiencias recientes han mostrado que la VE tipo 3, a la cual se adhiere la definición propuesta, implica una implementación compleja y dinámica de estrategias técnico-científicas, operativas y de innovación digital (Kaundal *et al.*, 2006). Bajo este enfoque, su aplicación sistémica a escalas de tiempo y espacio que garanticen la solución de un problema fitosanitario conducen al desarrollo de *Sistemas de Vigilancia Epidemiológica* (SVE), los cuales pueden ser referidos como *Programas de Vigilancia Epidemiológicos* en un contexto de política pública. En realidad, el enfoque de sistemas es natural porque su concepción y operación tiene como base el *sistema epidemiológico* en su moderna acepción abierta con n_i -subsistemas dinámicos, la población de plantas como subsistema integrador y el tiempo-región como dimensiones reguladoras de *entradas* (p.e., plaga(s), variedades) y *salidas* (p.e., carga inóculo, producción del cultivo) (Figura 1).

Un SVE tiene escalabilidad espacial variable. Sin embargo, a nivel regional se optimiza su propósito fitosanitario (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Flores-Sánchez *et al.*, 2017; Acevedo-Sánchez and Mora-Aguilera, 2016; Mora-Aguilera *et al.*, 2014e). Una región, en este contexto, es un área constituida por un conjunto de n -unidades productivas entre las que se establecen relaciones funcionales de interdependencia, directa o indirecta, por el uso común de recursos agroambientales, económicos y humanos, así como servicios, infraestructura y política pública específica (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Mora-Aguilera *et al.*, 2016b; Coria-Contreras *et al.*, 2015a,b; Mendoza-Ramos *et al.*, 2015a). Evidencias de algunos programas regionales fitosanitarios exitosos han demostrado que el manejo enfocado al cultivo puede coadyuvar a desarrollar estrategias de sustentabilidad y resiliencia productiva (Mora-Aguilera *et al.*, 2014d), los cuales no son factibles biológica, ambiental y técnicamente a nivel de unidades de producción o parcelas

time-region as *input* (e.g., pest(s), varieties) and *outputs* controlling dimensions (e.g., inoculum load, crop production) (Figure 1).

ESS has variable spatial scalability. However, its phytosanitary purpose is optimized at a regional level (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Flores-Sánchez *et al.*, 2017; Acevedo-Sánchez and Mora-Aguilera, 2016; Mora Aguilera *et al.*, 2014e). A region, in this context, is an area made up of a set of n -productive units among which functional relationships of interdependence are established, direct or indirect, through routinely everyday use of agro-environmental, economic and human resources, as well as specific services, infrastructure, and policies (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Mora-Aguilera *et al.*, 2016b; Coria-Contreras *et al.*, 2015a, b; Mendoza-Ramos *et al.*, 2015a).

Evidence from some successful regional phytosanitary programs has shown that crop-focused management can help develop strategies for sustainability and productive resilience (Mora-Aguilera *et al.*, 2014d), which are not biologically, environmentally, and technically feasible at the unit production level (field plot) or independent fields. In general, the field-plot vision of surveillance and other planned phytosanitary management practices, e.g., fungicides scheduled, is the reason for undesirable effects on productive assets: plant genetic erosion, loss of varietal resistance, development of resistance to limited mechanisms of action of pesticides, food safety problems, contamination of water and soil resources, etc. (Mora-Aguilera *et al.*, 2014c).

Surveillance in classical epidemiology

In classical epidemiology, *sensu* Vanderplank, *surveillance* has its antecedents in *forecasting models* and *early warnings* applied at the level of farm production units to support phytopathogen

independientes. En general, la visión parcelaria de la vigilancia y otras prácticas de manejo fitosanitario planeadas, p.e., calendarización de fungicidas, es la razón de efectos indeseables en los activos productivos: erosión génica, pérdida de resistencia varietal, desarrollo de resistencia a limitados mecanismos de acción de pesticidas, problemas de inocuidad, contaminación de recursos hídricos y edáficos, etc. (Mora-Aguilera *et al.*, 2014c).

La vigilancia en la epidemiología clásica

En la epidemiología clásica, *sensu* Vanderplank, la *vigilancia* tiene sus antecedentes en *modelos de pronóstico y alertas tempranas* aplicadas a nivel de unidades productivas parcelarias con el propósito de sustentar estrategias de control de fitopatógenos bajo el principio de *protección*. Notoriamente, la *prevención* estuvo ausente en estos seminales enfoques analíticos. Artículos de revisión exhaustivos permiten claramente delinear la evolución conceptual y aplicativa de modelos de pronóstico. Por ejemplo, Krause y colaboradores (1975), resaltaron la importancia mecanística de la biología de patógenos mediante el uso de variables asociadas al proceso patogénico, p.e., periodo de incubación (ver sección de algoritmos, Figura 5); Coakley y colaboradores (1985), y posteriormente Huber y Gillespie (1992), enfatizaron el empleo de sensores microclimáticos para generar variables climáticas predictoras. De Wolf e Isard (2007), sintetizaron los avances del modelaje cuantitativo y las perspectivas de la tecnología digital concluyendo que: ‘*efforts appear to be greater than just a few decades ago, and include novel applications of Bayesian decision theory. Advances in information technology have stimulated innovations in model application*’.

La *alerta temprana*, menos popular que el *pronóstico* en epidemiología clásica en realidad representó una variante conceptual, más que analítica, al

control strategies under the *protection* principle. Notoriously, *prevention* was absent from these seminal analytical approaches. Comprehensive review articles allow the conceptual and applicative evolution of forecasting models to be outlined. For example, Krause and collaborators (1975) highlighted the mechanistic importance of pathogen biology by using variables associated with the pathogenic process, e.g., the incubation period (see the algorithms section, Figure 5). Coakley and collaborators (1985), and further Huber and Gillespie (1992), emphasized using microclimatic sensors to generate predictive climatic variables. De Wolf and Isard (2007) analyzed the advances of quantitative modeling and the perspectives of digital technology, concluding that: ‘*efforts appear to be greater than just a few decades ago, and include novel applications of Bayesian decision theory. Advances in information technology have stimulated innovations in model application*’.

Early warning, less popular than *forecasting*, actually represented a conceptual variant rather than an analytical one. Its purpose was to generate a predictor as ‘early’ as possible in an epidemic progression induced by a specific phytopathogen. This predictor(s), generally climatic, is used as a criterion of actionability for control strategies with protective purposes. At present, an *early warning* has been mistakenly conceived as a synonym for ES, calling them *Early Warning Systems*, among others terms. Its greatest restrictiveness is its non-systemic condition. However, its analytical structure and its strong emphasis on climate variables have favored its digitized implementation by companies that market automated climate equipment for field-plot use in specific crops (<https://www.ambientweather.com/dadi6571.html>). Given the eventual adoption by a broad productive sector, its scope may be regional. However, its particular application to the end-user limits a comprehensive phytosanitary regional integration.

tener como propósito la generación de un predictor lo más ‘temprano’ posible en una progresión epidémica inducida por un fitopatógeno específico. Este predictor(es), generalmente climático, se emplea como criterio de accionabilidad para estrategias de control con un fin protectorio. En la actualidad, la *alerta temprana* se ha concebido erróneamente como sinónimo de VE denominándoseles *Sistemas de Alerta Temprana*, entre otros. Su mayor restrictividad es su condición no sistémica. Sin embargo, su estructura analítica y su fuerte énfasis en variables climáticas han favorecido su implementación digitalizada por empresas que comercializan equipos climáticos automatizados para uso parcelario en cultivos específicos (<https://www.ambientweather.com/dadi6571.html>). Ante la eventual adopción por un amplio sector productivo, su alcance puede ser regional. No obstante, su aplicación particularizada al usuario final limita la integración sistémica fitosanitaria.

Dos sistemas clásicos de *pronóstico*, los cuales inspiraron la adaptación o derivación de otros sistemas, ilustran como los sistemas web han permitido escalar y automatizar los modelos de vigilancia. En los 70’s, BLITECAST y FAST (del cual derivó posteriormente TOMCAST), fueron sistemas de pronóstico computarizados pioneros, los cuales generaron criterios de accionabilidad con base en *modelos empíricos determinísticos* combinando matrices de decisión con temperatura, precipitación, humedad relativa y mojado foliar para decidir la primera y subsecuentes aplicaciones de fungicidas para control de *Phytophthora infestans* y *Alternaria solani* (Madden *et al.*, 1978; Krause *et al.*, 1975). Estos modelos se desarrollaron en FORTRAN IV operados en computadoras tipo ‘mainframe’ IBM 370/168. El cálculo de parámetros con estos modelos requería el ingreso manual de datos climáticos. La operación de BLITECAST muestra claramente el principio que fundamenta un sistema de vigilancia

Two classic forecasting systems, which inspired the adaptation or derivation of other systems, illustrate how web systems have made it possible to scale and automate surveillance models. In the 70’s, BLITECAST and FAST (from which TOMCAST later derived) were pioneering computerized forecasting systems, which generated actionability criteria based on empirical deterministic models combining decision matrices with temperature, precipitation, relative humidity, and leaf wetness to decide the first and subsequent applications of fungicides to control *Phytophthora infestans* and *Alternaria solani* (Madden *et al.*, 1978; Krause *et al.*, 1975). These models were developed in FORTRAN IV operated on IBM 370/168 “mainframe” computers. The calculation of parameters with these models required the manual input of climatic data. The BLITECAST operation clearly shows the principle underlying a surveillance system and the aspects that current digital technology has allowed automating (highlighted with underlining): “*When a grower desires a Blitecast, he telephones the Blitecast operator and reports his most recently recorded environmental data. The operator submits data to the computer via a typewriter terminal. The computer analyzes data within a fraction of a second and returns the forecast and spray recommendation to the operator, who relays it to the grower. The entire operation can be completed during a standard 3-minute telephone call. In this way, it is possible to provide, from a central office, Blitecast for 15 to 20 distant locations in one hour*” (Krause *et al.*, 1975). Later, in the 90’s, the actionability criteria were generated from empirical models directly on personal computers using programs developed in Turbo-C or Turbo Pascal, among others, self-executable in the MS DOS® operating system, the predecessor of MS Windows®. Examples of these systems are

y los aspectos que la tecnología digital actual ha permitido automatizar (resaltado con subrayado): *'When a grower desires a Blitecast, he telephones the Blitecast operator and reports his most recently recorder environmental data. The operator submits the data to the computer via a typewriter terminal. The computer analyzes the data within a fraction of a second and returns the forecast and spray recommendation to the operator, who relays it to the grower. The entire operation can be completed during a standard 3-minute telephone call. In this way, it is possible to provide, from a central office, Blitecast for 15 to 20 distant locations in one hour'* (Krause *et al.*, 1975). Posteriormente, en los 90's los criterios de accionabilidad se generaron a partir de *modelos empíricos* directamente en computadoras personales mediante programas desarrollados en Turbo-C o Turbo Pascal, entre otros, autoejecutables en el sistema operativo MS DOS®, antecesor de MS Windows®. Ejemplos de estos sistemas son DMCAST y PLASMO para el control de *Plasmopara viticola* (Park *et al.*, 1997; Rosa *et al.*, 1993). Actualmente, este tipo de sistemas se distribuyen comercialmente como complemento de equipos climáticos para uso individual parcelario aplicable a plagas y enfermedades de vid (*Vitis* spp.), almendro (*Prunus dulcis*), manzano (*Malus domestica*), peral (*Pyrus communis*) y duraznero (*Prunus persica*) (<https://www.ambientweather.com/dadi6571.html>). Esta visión comercial ha limitado el enfoque SVE regional original y restringiendo el *sistema epidemiológico* al componente *clima* como variables predictoras, una tendencia operativa práctica a nivel parcelario, pero limitado en una visión productiva sustentable (Kim *et al.*, 2020; Firanj Sremac *et al.*, 2018).

Los avances de la tecnología digital web y telefonía móvil durante el presente siglo han impulsado la VE regional y fortalecido estrategias predictivas clásicas (Coria-Contreras *et al.*, 2019;

DMCAST and PLASMO to control *Plasmopara viticola* (Park *et al.*, 1997; Rosa *et al.*, 1993). Currently, these types of systems are commercially distributed as a complement to climatic equipment for individual field-plot use applicable to pests and diseases of grapes (*Vitis* spp.), almond (*Prunus dulcis*), apple (*Malus domestica*), pear (*Pyrus communis*), and peaches (*Prunus persica*) (<https://www.ambientweather.com/dadi6571.html>). This commercial vision has limited the original regional ESS approach and biased the *epidemiological system* to the *climate* component as predictive variables, a pragmatically operational trend feasible at the field-plot level but limited to the sustainable plant health approach (Kim *et al.*, 2020; Firanj Sremac *et al.*, 2018).

During this century, advances in digital web and mobile telephony technology have promoted regional ES and strengthened classic predictive strategies (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Mora-Aguilera *et al.*, 2015a). However, the adoption of systemic epidemiological approaches remains limited (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017), privileging, for example, automatic and massive generation variables such as climatic ones (Kim *et al.*, 2020; Firanj Sremac *et al.*, 2018; Newlands, 2018), or relying heavily on classical theoretical modeling pathogen-oriented (Parnell *et al.*, 2017). The evolution of knowledge and technological developments in ES has been limited mainly to fulfill the principles of *infection* and *protection* at the field-plot level. In general, the biological and regional *holistic* vision has been excluded, and the *systemic* application of the *epidemiological system* as a comprehensive rational framework has been absent or partially applied. We must overcome this restrictive scientific and technological approach based on a new paradigm where the spatial unit is scaled to the region (Mora-Aguilera *et al.*, 2014e), and the

Mora-Aguilera *et al.*, 2015a). Sin embargo, la adopción de enfoques epidemiológicos sistémicos sigue siendo limitada (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017), privilegiándose por ejemplo variables de generación automática y masiva como las climáticas (Kim *et al.*, 2020; Firanj Sremac *et al.*, 2018; Newlands, 2018), o enfatizando modelos teóricos clásicos orientados al patógeno (Parnell *et al.*, 2017). La evolución del conocimiento y desarrollos tecnológicos en VE se han circunscrito principalmente a operar los principios de *infección* y *protección* a nivel parcelario. En general, se ha excluido la visión *holística* biológica y regional, y la aplicación *sistémica* del *sistema epidemiológico*, como marco racional integral, ha estado ausente o se ha aplicado parcialmente. Este enfoque científico y tecnológico restrictivo debe superarse sobre la base de un nuevo paradigma donde se escale la unidad espacial a la región (Mora-Aguilera *et al.*, 2014e), y la salud de la planta sea el eje integrador de un nuevo *sistema epidemiológico* como base racional de la *prevención* y *protección* (Figura 1). La tendencia a una visión *holística-sistémica* será el gran reto de la fitosanidad en el futuro. Paradójicamente, el problema no parece ser tecnológico, sino visiones científicas clásicas atomizadas por la especialización. En contrapeso, la tendencia a una agricultura de precisión y extensiva, orientada a satisfacer la necesidad de alimentos y a fortalecer cadenas de valor (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019), forzará el desarrollo de SVE regionales, nacionales y globales.

Marco normativo y operativo

SVE a nivel regional requiere efectiva planeación, operatividad y eventualmente marcos legales que idealmente pueden cumplir instituciones fitosanitarias e instancias coadyuvantes. La Organización Mundial de Comercio (OMC), CIPF,

plant's health, in the broad sense, is the integrating axis of a new *epidemiological system* as a rational basis for *prevention* and *protection* (Figure 1). The trend towards a *holistic-systemic* vision will be a big challenge for plant health in the future. Paradoxically, the problem does not seem to be the technological one, but the classical scientific views atomized by specialization. In contrast, the precision and extensive agriculture trend to satisfy food supplies and crops value chain (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019) will force comprehensive regional, national and global ESS.

Regulatory and operational framework

ESS at the regional level requires effective planning, operability, and eventually legal frameworks that phytosanitary institutions and organizational partners can ideally meet. The World Trade Organization (WTO), IPPC, National and Regional Plant Protection Organizations (NPPO and RPPO, respectively), and growers organized linked to NPPOs have established legal or regulatory frameworks to safeguard plant health and food safety in a regional environment, primarily for international trade purposes (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019). In this context, *surveillance*, without epistemological associativity with *epidemiology* and an apparent reference to the pest in its broad sense, was conceived with a normative approach unrelated to methodological developments of classical epidemiology. However, the emergence and mobility of the recurrent pest through alternative routes to commercial paths (Mendoza-Ramos *et al.*, 2021; Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2016a; Mora-Aguilera *et al.*, 2015a; Mora-Aguilera *et al.*, 2014a), has caused some of these instances to promote the scientific-technological development of ESS beyond the regulatory

Organismos Nacionales y Regionales de Protección Fitosanitaria (ONPF y ORPF, respectivamente), y productores organizados y vinculados con ONPFs, han establecido marcos jurídicos o normativos para salvaguardar la sanidad e inocuidad de productos agrícolas en un entorno regional, principalmente con fines de comercio internacional (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019). En estos ámbitos la *vigilancia*, sin asociatividad epistemológica a la *epidemiología*, y en clara referencia a la plaga en su concepción amplia, fue concebida con un enfoque normativo desvinculada de desarrollos metodológicos de la epidemiológica clásica. No obstante, la recurrente emergencia y movilidad de plagas, por vías alternas a flujos comerciales (Mendoza-Ramos *et al.*, 2021; Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2016a; Mora-Aguilera *et al.*, 2015a; Mora-Aguilera *et al.*, 2014a), ha provocado que algunas de estas instancias impulsen el desarrollo científico-tecnológico de SVE más allá del marco normativo establecido, por ejemplo, en NIMF 6 *Directrices para la Vigilancia* publicada por la CIPF (<https://www.ippc.int/es/>). Esta norma, cuyo fin es armonizar la vigilancia entre países adherentes a la CIPF, es efectiva para determinar el estatus de una plaga, pero altamente restrictiva conceptual y metodológicamente para sustentar sistemas cuantitativos robustos, inferenciales y aplicados a toma de decisiones fitosanitarias en procesos productivos (Cuadro 1).

En 2019, se publicó la nueva versión de la NIMF 6 denominada *Vigilancia* (<https://www.ippc.int/es/>). En esta versión aún prevalece un marco conceptual epidemiológico restrictivo, pero se amplían opciones analíticas y metodológicas acordes a la epidemiología cuantitativa con el fin reducir el riesgo de movilidad de plagas por efecto del comercio internacional y otras vías. Sin embargo, también se reconoce la importancia de proteger cultivos estratégicos de plagas preexistentes en un país

framework established, for example, in the ISPM 6 *Guidelines for Surveillance* (<https://www.ippc.int/es/>). Such normative, whose purpose is to harmonize surveillance among countries adhering to the IPPC, effectively determines the status of a pest but is highly restrictive conceptually and methodologically to support robust quantitative systems, inferential and applied to phytosanitary decision-making in crop production (Table 1).

In 2019, the new version of ISPM 6 called *surveillance* was published. A restrictive epidemiological conceptual framework still prevails in this version, but analytical and methodological options are expanded according to quantitative epidemiology to reduce the risk of pest mobility due to international trade and other paths. However, the importance of protecting strategic crops from pre-existing pests in a country is also recognized (<https://www.ippc.int/es/>). The ISPMs are minimum guidelines for NPPOs that can be optimized conceptually and methodologically, with the corresponding scientific support. Thus, each country can develop official ES programs according to its phytosanitary needs and legal framework (Table 1). In addition, organized growers or companies can implement ES programs, generally type 2 or 3, which may have the technical and/or financial support of the NPPO.

An example is the Integral System of Protection and Epidemiological Surveillance of Agave (SIVEA in Spanish), associated to the Tequila Regulatory Council (TRC) with technical and financial official support (Table 1). In other cases, productive associations can develop and operate their ES programs according to their productive and commercial needs. Adherence to international regulations is not required while ensuring productivity and effective management of phytosanitary risks. The Guatemalan National Coffee Association (ANACAFE), the Citriculture

(<https://www.ippc.int/es/>). Las NIMFs son directrices mínimas para ONPFs que pueden optimizarse conceptual y metodológicamente, con el correspondiente sustento científico. Así, cada país puede desarrollar programas de VE oficiales acorde a sus necesidades fitosanitarias y marco legal (Cuadro 1). En adición, por iniciativa de productores organizados o empresas es posible implementar programas de VE, generalmente de tipo 2 o 3, los cuales pueden tener el soporte técnico y/o financiero del ONPF. Un ejemplo lo constituye el Sistema Integral de Protección y Vigilancia Epidemiológica del Agave (SIVEA) asociado al Consejo Regulador del Tequila (CRT) con apoyo técnico y financiero del ONPF (Cuadro 1). En otros casos, organizaciones productivas pueden desarrollar y operar sus propios programas de VE acordes a sus necesidades productivas y de comercio. No se requiere la adherencia a la normatividad internacional mientras se garantice la productividad y un manejo efectivo de riesgos fitosanitarios. La Asociación Nacional del Café de Guatemala (ANACAFE), Fundación de Defensa de la Citricultura (FUNDECITRUS) y la Fundación ABC constituida para la asistencia en trigo, soya y frijol en Brasil, son ejemplos con instancias científicas no gubernamentales financiados directamente por productores, con limitada o nula participación oficial (Cuadro 1).

Programas de vigilancia epidemiológica y la tecnología digital

La vigilancia epidemiológica a escala regional puede generar y emplear bases de datos constituidas por millones de metadatos. Superar la barrera analítica del dato parcelario fue posible con el advenimiento de tecnología digital de los 90's. Hay tres sucesos tecnológicos que posibilitaron romper con la vigilancia parcelaria y con el uso de modelos de pronóstico locales: Desarrollo del World Wide Web

Defense Foundation (FUNDECITRUS), and the ABC Foundation constituted for assistance in wheat, soybeans, and beans in Brazil, are examples of scientific non-governmental entities financed directly by growers, with limited or no official participation (Table 1).

Epidemiological surveillance programs and digital technology

Epidemiological surveillance at the regional scale can generate and use databases consisting of millions of metadata. Overcoming the analytical barrier of field-plot data was possible due to the advent of digital technology in the 90's. Three technological events made it possible to break with field-plot surveillance and the use of local forecasting models: Development of the World Wide Web (WWW), which allows data to be consulted anywhere in the world through an internet service provider; the standardized SQL database language for storing large volumes of multidimensional structured data and its subsequent consultation 24/7 (h day⁻¹) (e.g., Apache Derby) (Chiavegatto, 2015); and finally, the Android[®] mobile operating system, developed in open source programs, which enabled the integration of programs (Apps) to record variables measurements *in situ*, transfer in real-time to WWW databases to automate epidemiological analyzes and reception of phytosanitary alerts (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). The digital revolution made the cross-sectional integration of plant health at the community level of crops (e.g., sour and sweet citrus species) and pests that interact in a region (e.g., CLas, CTV, *Diaphorina citri*, *Toxoptera citricida* in citrus). As a result, at the scientific level, it was possible to operate complexity, as a *holistic-systemic* approach, to epidemiological responses and, at the productive level, correctly conceive and assess sustainability

(WWW), que permite la consulta de datos en cualquier parte del mundo a través de un proveedor de internet; el lenguaje de base de datos estandarizado SQL para almacenamiento de grandes volúmenes de datos multidimensionalmente estructurados y su posterior consulta 24/7 (h día⁻¹) (p.e., Apache Derby) (Chiavegatto, 2015); y por último, el sistema operativo móvil Android®, desarrollado en programas de código abierto, que posibilitó la integración de programas (Apps) para el registro de medición de variables *in situ*, transferencia en tiempo real a bases de datos WWW para automatizar análisis epidemiológicos y recepción de alertas sanitarias (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). La revolución digital hizo posible la integración transversal de la fitosanidad a nivel de comunidad de cultivos (p.e., especies de cítricos agrios y dulces) y plagas que interactúan en una región (p.e., CLas, CTV, *Dia-phorina citri*, *Toxoptera citricida* en cítricos), viabilizando a nivel científico operar la complejidad como enfoque *holístico-sistémico* de respuestas epidemiológicas, y a nivel productivo concebir y medir correctamente indicadores de sustentabilidad y resiliencia. Previo a los desarrollos tecnológicos de los 90's, el investigador debía explotar al máximo limitadas bases de datos mediante modelos programados en Fortran o Pascal ejecutados mediante tarjetas perforadas en grandes computadoras IBM o *mainframe* (Casacuberta, 2013). Alternativamente, bases de datos fitosanitarias creadas por la academia u organismos internacionales (p.e., FAO) se masificaron mediante dispositivos digitales asociados a gestores de datos tipo dBase pero de nula o limitada aplicación directa en modelaje.

En la actualidad, la *vigilancia* 'normativa' (i.e., VE tipo 1 y 2), la que aporta listados oficiales de plagas regionalmente presentes, análisis descriptivos y categóricos de plagas en un entorno web, tiene amplia aceptación en ONPFs y organismos regionales de protección fitosanitarios (ORPF) como

and resilience indicators. Before the technological developments of the 90's, the researcher had to exploit limited databases to the maximum through models programmed in Fortran or Pascal executed using punched cards in large IBM or *mainframe* computers (Casacuberta, 2013). Alternatively, phytosanitary databases created by academia or international organizations (e.g., FAO) were massified by digital devices associated with dBase-type data managers but with no or limited direct application in modeling.

At present, 'normative' *surveillance* (i.e., VE type 1 and 2), which provides official lists of regionally present pests, descriptive and categorical analyzes of pests using a web environment, has wide acceptance in NPPOs and regional phytosanitary protection organizations (RPPOs) such as NAPPO, OIRSA, and EPPO, yet with asymmetric advances (Table 1). These instances operate ES following regulatory and transparency guidelines established in the Agreements on Sanitary and Phytosanitary Measures of the World Trade Organization (WTO), further formalized and expanded in the IPPC. These qualitative ES web programs vary in flexibility, dynamism, user interaction, report generation, etc. Methodologically, they depend on pest diagnosis protocols and sampling and/or monitoring strategies (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017). Consequently, they are feasible to be implemented with the technical expertise of RPPO or NPPO without supervised scientific execution. In contrast, the application and adoption of ES type 3 have been limited for the lack of rational models and conceptual, methodological, operational, and technological constraints. An effective *holistic-systemic* type 3 ESS is generated from the interdisciplinary conception of three *interdependent models*: A) *Integrative innovation model* between research, institutional policies, and operational structures. This guarantees

NAPPO, OIRSA y EPPO, aunque con avances asimétricos (Cuadro 1). Estas instancias operan VE en concordancia con lineamientos regulatorios y de transparencia establecidos en los Acuerdos sobre Medidas Sanitarias y Fitosanitarias de la Organización Mundial de Comercio (OMC), posteriormente formalizados y ampliados con la CIPF. Estos programas de VE cualitativos digitales varían en flexibilidad, dinamismo, interacción con el usuario, generación de reportes, etc. Metodológicamente son dependientes de protocolos de diagnóstico de plagas y de estrategias de muestreo y/o monitoreo (Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017). Consecuentemente son factibles de implementarse en el ámbito técnico de un ORPF u ONPF sin supervisión científica. En contraste, la aplicación y adopción de VE tipo 3 ha sido limitada por deficientes modelos racionales y por restricciones conceptuales, metodológicas, operativas y tecnológicas. Un SVE *holístico-sistémico* efectivo tipo 3 se genera a partir de la concepción interdisciplinaria de tres *modelos* interdependientes: A) *Modelo de innovación integral* entre investigación, políticas institucionales y estructuras operativas. Este permite garantizar la adopción y aplicabilidad a partir de estrategias de gestión y vinculación interinstitucionales; B) *Modelo científico-tecnológico* (Figura 2); y C). *Modelo de integración de tecnologías digitales* (Figura 3), los cuales permiten planear y aplicar tecnologías pertinentes a las necesidades científicas del SVE (Mendoza-Ramos *et al.*, 2021; López-Bautista *et al.*, 2020; Coria-Contreras *et al.*, 2019; Acevedo-Sánchez *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2016b; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d). Otra limitante que debe superarse es la tendencia a emplear un marco racional analítico generalmente restringido o acotado a un subsistema del *sistema epidemiológico* como contexto predictor de cambios en la dinámica de plaga(s) (Figura 1). Por ejemplo, una tendencia en los últimos 20 años ha sido el énfasis en variables del subsistema clima,

the adoption and applicability of inter-institutional management and organizational strategies; B) *Scientific-technological model* (Figure 2); and C) *Integrative digital technologies model* (Figure 3), which allow planning and applying relevant technologies to the scientific needs of the ESS (Mendoza-Ramos *et al.*, 2021; López-Bautista *et al.*, 2020; Coria-Contreras *et al.*, 2019; Acevedo-Sánchez *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2016b; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d). Another limitation to overcome is the tendency to use a rational, analytical framework generally restricted or limited to a subsystem of *the epidemiology system* as a predictive context of changes in pest dynamics (Figure 1). For example, a trend in the last 20 years has been the emphasis on variables of the climate subsystem, such as temperature, wind, relative humidity, etc., favored by the availability of digital weather stations and public access to regional databases (e.g., CONAGUA in Mexico) and global (NOAA) (Magarey and Isard, 2017), for the development of regional phytosanitary risk alerts (Kim *et al.*, 2020; Moschini *et al.*, 2004). This subsystem has shown viability in extensive crops with linear thermal gradients (Tsukahara *et al.*, 2008; Moschini *et al.*, 2004), but in general, its application is not feasible in heterogeneous agroecosystems due to the exclusion of other subsystems associated with rational biological processes of pests (Mora-Aguilera *et al.*, 2016a, b; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d) (Figure 1). A systemic ESS is inherently holistic. It requires a robust *epidemiological system* and integrative models as rational frame. Digital technology is clearly subordinate to ESS needs and objectives. It is not the ultimate goal (Figure 4).

The general structure of an Epidemiological Surveillance System type 3

A web-based ESS in the *holistic-systemic* approach, a type 3 ES, corresponds

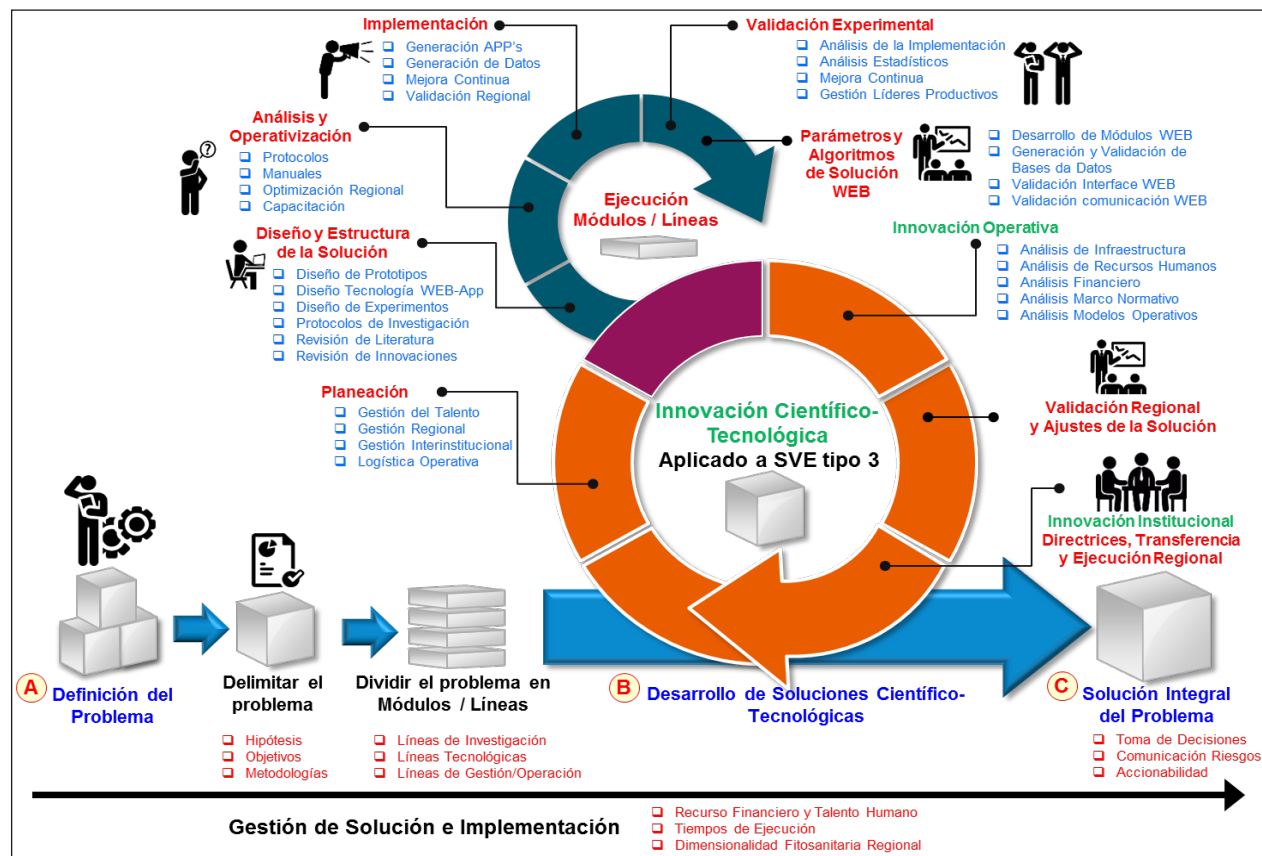


Figura 2. Modelo científico-tecnológico empleado en la concepción, desarrollo, validación e implementación web de un Sistema de Vigilancia Epidemiológico (SVE) tipo 3. El modelo tiene tres ejes principales: Definición del problema (A); desarrollo de soluciones científico-tecnológicas (B); y solución integral del problema (C). El modelo genera innovación tecnológica continua, la cual detona innovaciones institucionales y operativas complementarias requeridas para garantizar el éxito SVE. Fuente: CP-LANREF.

Figure 2. Scientific-technological model used in the conception, development, validation and implementation of a web-based Epidemiological Surveillance System (ESS) type 3. The model is based on three main elements: Definition of the problem (A); development of scientific-technological solutions (B); and comprehensive solution (C). The model generates continuous technological innovations which prompt complementary institutional and operative innovations to guaranty ESS success. Source: CP-LANREF.

como temperatura, viento, humedad relativa, etc., favorecido por la disponibilidad de estaciones meteorológicas digitales y acceso público a bases de datos regionales (p.e., CONAGUA en México) y globales (NOAA) (Magarey e Isard, 2017), para el desarrollo de alertas de riesgos fitosanitarios regionales (Kim *et al.*, 2020; Moschini *et al.*, 2004). Este subsistema ha mostrado viabilidad en cultivos extensivos con gradientes térmicos lineales (Tsuka-

to a complex dynamic system characterized by the interaction and interdependence of multiple concurrent processes, all derived from the epidemiology system rational frame (Figure 2-4), which operate with the following assumptions: 1) Every phytosanitary phenomenon is multidimensional and has a highly dynamic multivariate variability in time and space. Its characterization and quantification are the basis

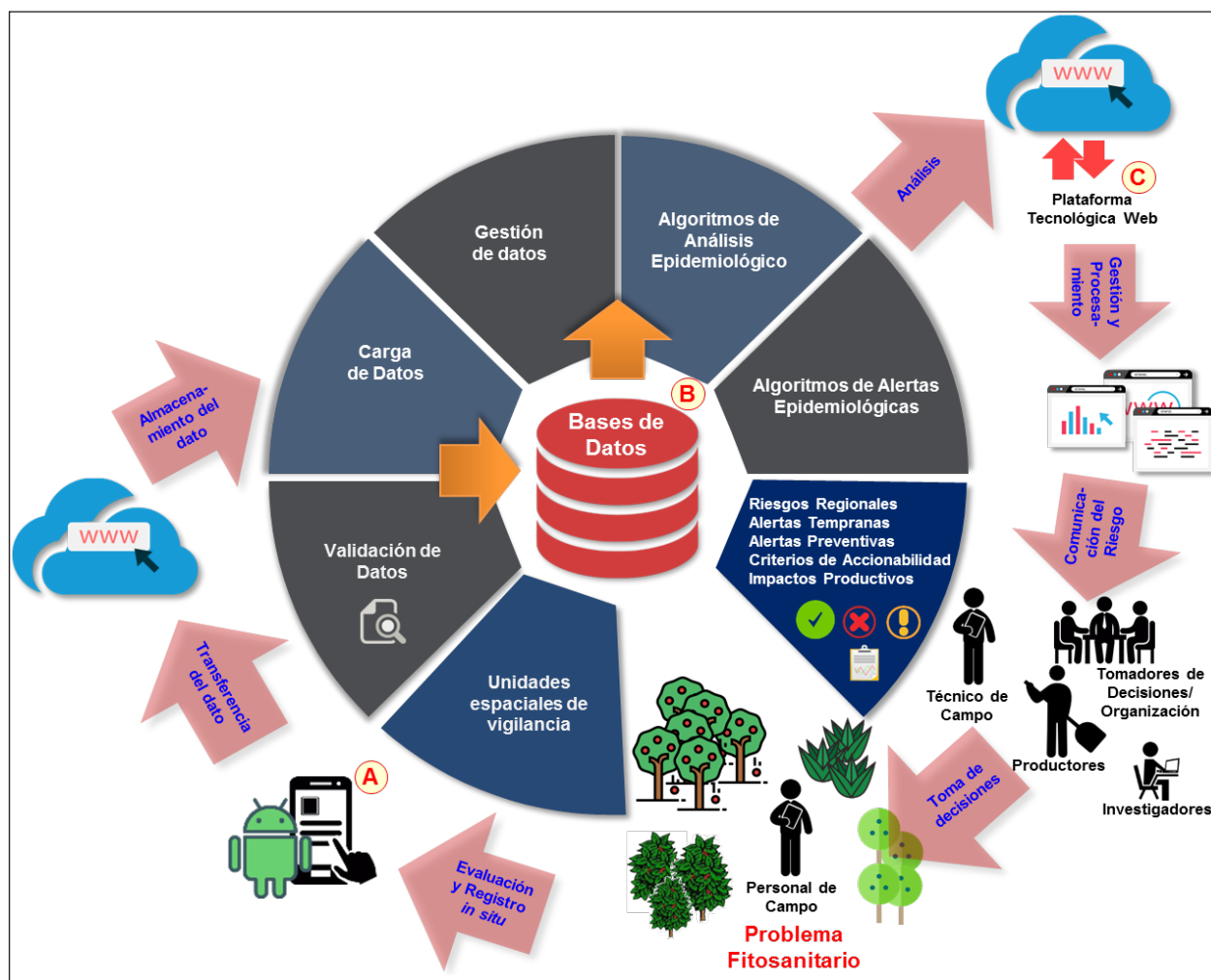


Figura 3. *Modelo de integración de tecnología digital* aplicable a la generación y gestión web de datos de un Sistema de Vigilancia Epidemiológico tipo 3 mediante tres elementos integrales: Diseño de aplicaciones móviles de código abierto para evaluación y registro de n -variables epidemiológicas *in situ* (A); diseño estructural de n -bases de datos relacionales (B); y desarrollo de una plataforma modular web para gestión de metadatos, análisis y comunicación de riesgos (C) (Figura 4). Fuente: CP-LANREF.

Figure 3. *Integrative model of digital technology* applicable to the development and processing of data in a web-based Epidemiological Surveillance System type 3 through three integral elements: Design of open source mobile applications for evaluation and records of epidemiological n -variables *in situ* (A); structural design of relational n -databases (B); and development of a modular web-platform for metadata processing, analysis, and risk communication (C) (Figure 4). Source: CP-LANREF.

hara *et al.*, 2008; Moschini *et al.*, 2004), pero en general su aplicación es inviable en agroecosistemas heterogéneos al excluir otros subsistemas asociados a sensibles procesos biológicos de las plagas (Mora-Aguilera *et al.*, 2016a,b; Mora-Aguilera *et al.*, 2014b) (Figura 1). Un SVE sistémico es intrínse-

of modeling, epidemic indicators, and algorithms development; 2) Require planned feedback, and optimization protocols, e.g., a molecular diagnosis can correct risk factors, or a new pest incursion implies reconfiguring prevalence algorithms and analyses interfaces; 3) It involves non-linear

camente holístico. Requiere un *sistema epidemiológico* robusto y modelos integrativos como marco racional. La tecnología digital claramente se subordina a las necesidades y objetivos del SVE. Es la consecuencia, no el fin (Figura 4).

functional relationships between variables whose parameters are also relative in space-time. For example, the sporulation rate of *H. vastatrix* versus leaf severity does not have a simple proportional relationship, and its estimated parameters

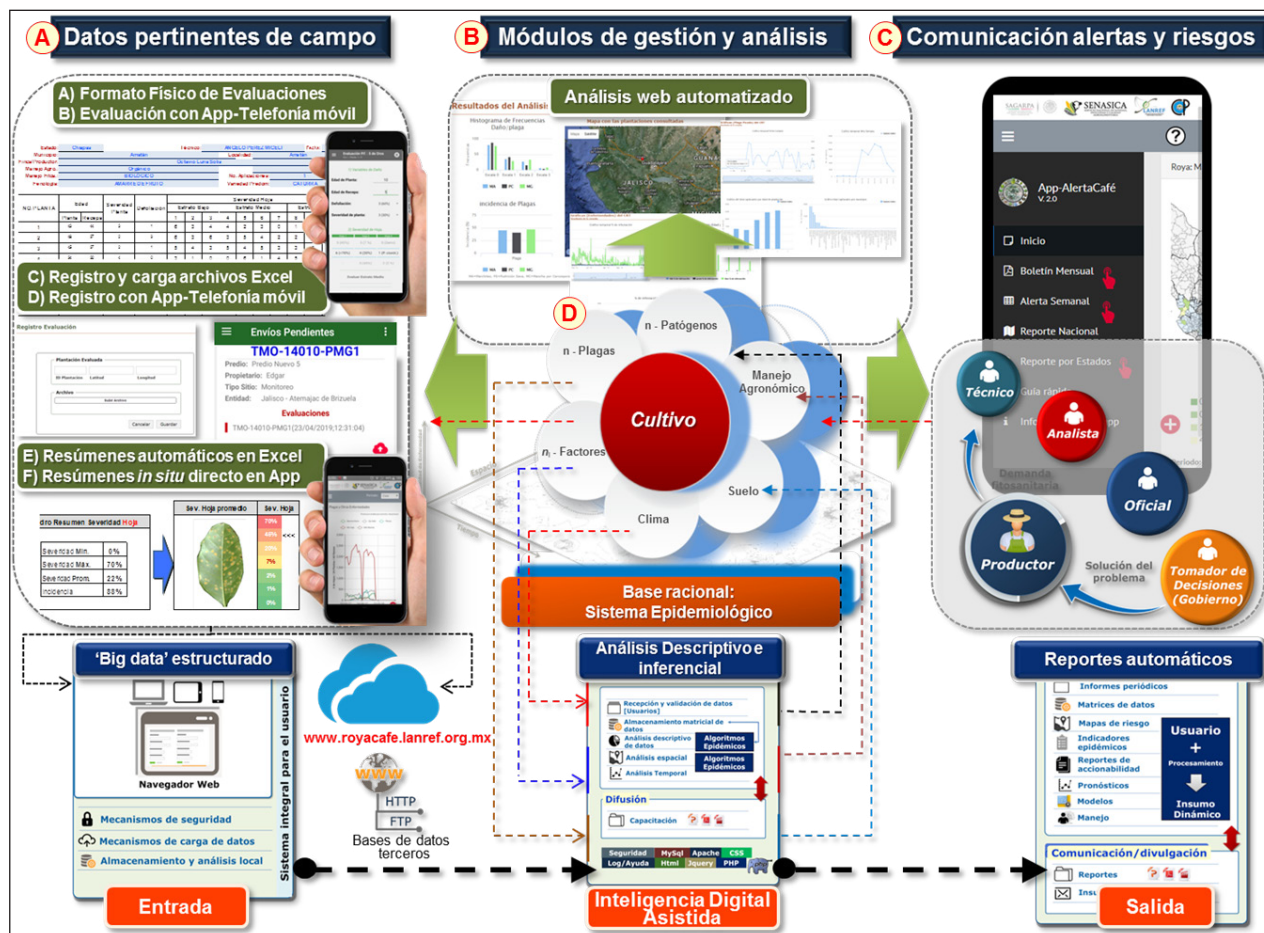


Figura 4. Modelo sistémico general de un Sistema de Vigilancia Epidemiológico tipo 3 operado por técnicos capacitados en la concepción *holística-sistémica* de los principios de *prevención* y *protección* aplicados al manejo de plagas. Integra aplicaciones móviles *ad hoc* para registro de datos pertinentes de campo (A) (Figura 3), su envío en tiempo real a una plataforma web modular para gestión de base de datos y análisis dinámico automatizado (B), y comunicación de riesgos mediante la generación de gráficas descriptivas, indicadores epidémicos y alertas epidemiológicas aplicadas a toma de decisiones en *manejo integrado regional fitosanitario* sustentable (C). El modelo tiene como base racional el novel *sistema epidemiológico* (D) (Figura 1). Fuente: CP-LANREF.

Figure 4. General systemic model of a web-based Epidemiological Surveillance System type 3 implemented by trained human resources in the *holistic-systemic* conception of the *prevention* and *protection* principles applied to pest management. It is supported by *ad hoc* mobile applications for pertinent field data collection (A) (Figure 3), its sending in real-time to a modular web system for big data management and automated dynamic analyses (B), and risk communication through descriptive graphics, epidemic indicators and epidemiological alerts applied to decision making in *regional integrated phytosanitary management* (C). The model has the novel *epidemiological system* as comprehensive approach (D) (Figure 1). Source: CP-LANREF.

Estructura general de un Sistema de Vigilancia Epidemiológico tipo 3

Un SVE web en la concepción *holística-sistémica*, es decir un VE tipo 3, corresponde a un *sistema dinámico complejo* caracterizado por la interacción e interdependencia de múltiples procesos concurrentes, todos derivados a partir del marco racional del *sistema epidemiológico* (Figura 2-4), los cuales operan con las siguientes asunciones: 1) Todo fenómeno fitosanitario es multidimensional y posee una variabilidad multivariada altamente dinámica en tiempo y espacio. Su caracterización y cuantificación es la base del modelaje, indicadores epidémicos y desarrollo de algoritmos; 2) Requiere procedimientos planeados de retroalimentación y optimización, p.e., un diagnóstico molecular puede corregir factores de riesgo u ocurrencia de una nueva plaga implica reconfigurar algoritmos de prevalencia y módulos de análisis; 3) Involucra relaciones funcionales no lineales entre variables cuyos parámetros además son relativos en espacio-tiempo, p.e., la tasa de esporulación de *H. vastatrix* versus severidad no tiene una relación proporcional simple y sus parámetros estimados son dependientes de variedad de café (*Coffea arabica*) o factores de manejo (Mendoza-Ramos *et al.*, 2015b); 4) Incluye mediciones cualitativas (p.e., categorías de manejo agronómico) y cuantitativas (i.e., número de hojas con lesiones de roya), lo cual diversifica las estrategias analíticas; y 5) El factor humano es parte sustancial del *sistema*. Directamente, aportando calidad del dato registrado en campo y en adopción de criterios de accionabilidad preventiva/protectora; e indirectamente, en planeación de política fitosanitaria y agrícola. Debido a la complejidad intrínseca, un SVE requiere un enfoque de *holístico-sistémico* e idealmente un equipo interdisciplinario involucrado en procesos cíclicos de análisis y síntesis conducentes a la solución del problema (Figura 1 y 2).

are dependent on the coffee variety (*Coffea arabica*) or management factors (Mendoza-Ramos *et al.*, 2015b); 4) It includes qualitative (e.g., agronomic management categories) and quantitative measurements (e.g., number of leaves with rust lesions), which diversify the analytical strategies; and 5) The human factor is a substantial part of the system. Directly, by providing quality of data records collected on the field and adopting preventive/protective actionability criteria; and indirectly, thought phytosanitary and agricultural policy planning. Due to the intrinsic complexity, an ESS requires a *holistic-systemic* approach and, ideally, an interdisciplinary team involved in cyclical processes of analysis and synthesis, leading to the solution of the problem (Figure 1 and 2).

This *holistic-systemic* approach results in a digital technological model of innovation (Figure 3) (Kang *et al.*, 2010), but articulated to a rational research framework to support the development of methods and algorithms in solving the phytosanitary problem (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d; Kuang *et al.*, 2012). The general structure of a web-based ESS has three perfectly differentiated components: 1) Generation of relevant field data through App-Web platform synchronization; 2) Modular system for advanced data management and analysis in the web platform and restricted analysis in the App; 3) Alerts and risks communication. These components have flow diagrams specific to the phytosanitary problem, so they have their digital programming structure and cannot be used arbitrarily (Figure 4) The development core can be a back-end programming language like PHP complemented with others front-end types like JavaScript. In this concept, a *web platform* should be understood as a web interface specifically designed and developed to graphically represent and/or intervene in a big phytosanitary database through specific user requirements upon an automatized menu

Este enfoque *holístico-sistémico* resulta en un modelo tecnológico digital de innovación (Figura 3) (Kang *et al.*, 2010), pero articulado a un marco racional de investigación para sustentar el desarrollo de algoritmos en la solución del problema fitosanitario (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d; Kuang *et al.*, 2012). La estructura general de un SVE web tiene tres componentes perfectamente diferenciados: 1) Generación de datos pertinentes de campo a través de sincronización App-Plataforma Web; 2) Sistema modular de gestión y análisis avanzados en Plataforma Web y análisis restringido en App; 3) Comunicación de alertas y riesgos. Estos componentes poseen diagramas de flujo específicos al problema fitosanitario por lo que poseen su propia estructura digital de programación y no pueden aplicarse indiscriminadamente (Figura 4). El núcleo de desarrollo implica un lenguaje de programación a nivel servidor, como PHP, complementado con otro usuario-interfaz, como JavaScript. Una *plataforma* debe entenderse aquí como una interfaz web específicamente diseñada y desarrollada para representar gráficamente y/o intervenir grandes bases de datos fitosanitarias a través de requerimientos específicos del usuario a partir de un conjunto automatizado de opciones propuestas para la comprensión y solución de un problema fitosanitario. Sin embargo, una plataforma web, orientada a simplificar las necesidades del usuario, representa únicamente el modelo digital operativo y no la integralidad del proceso *holístico-sistémico* asociados con un SVE tipo 3 que un equipo interdisciplinario de expertos supervisa y aplica mejora continua (Figura 2-4).

Aplicaciones móviles – plataformas web en la gestión del dato epidemiológico

La telefonía móvil y el desarrollo de aplicaciones (Apps) para operar en esos dispositivos

provided to comprehend and solve a phytosanitary problem. However, the intended user-friendly web platform represents only the operational digital model, not the comprehensiveness of the *holistic-systemic* process associated with an ESS type 3 that an interdisciplinary team supervises and continuously improves (Figure 2 - 4).

Mobile applications - web platforms in the management of epidemiological data

Mobile telephony and the development of applications (Apps) to operate on these devices have revolutionized ES, being fundamental to ESS type 3, in the last ten years (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017; Aanensen *et al.*, 2009) (Figure 3 and 4). Apps with relevant architecture allow the recording and transferring data in real-time with telephone service providers and low-cost equipment. Android®, the popular open-source operating system, has favored the generation and innovation of Apps according to specific ESS needs. However, these developments must ensure adequate biological, epidemiological, and operational bases for functional purposes. An interdisciplinary team is essential to achieve this purpose. The usability growing trend of Apps in ES, and in general in phytosanitary programs, has exhibited application failures because its conception is delegated to the software developer.

Additionally, an App can be designed for particular purposes, e.g., to assess disease severity, sampling units calculation, georeferencing of suspicious pests and symptoms, and to the record of trapped individuals (Pethybridge and Nelson, 2018; Pethybridge and Nelson, 2015). This leads to the excessive fragmentation of a phytosanitary problem in multiple Apps, but handily for ES type 1 and 2. In contrast, a generic App, overloaded with modules and menu tools can be complex

ha revolucionado la VE, siendo fundamental para SVE tipo 3 en los últimos 10 años (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017; Aanensen *et al.*, 2009) (Figura 3 y 4). Apps con arquitectura pertinente permiten registrar y transferir datos en tiempo real con servicios telefónicos y equipos de bajo costo. Android®, el popular Sistema Operativo de código abierto, ha favorecido la generación e innovación de Apps acordes a necesidades específicas SVE. Sin embargo, estos desarrollos deben asegurar una adecuada integración de bases biológicas, epidemiológicas y operativas con fines funcionales. Un equipo interdisciplinario es fundamental para lograr este propósito. La tendencia creciente del empleo de Apps en VE, y en general en la fitosanidad, ha exhibido fallas aplicativos debido a que se delega su concepción al desarrollador de software.

Adicionalmente, una App puede diseñarse para fines muy específicos, p.e., evaluar severidad de enfermedad, cálculos de unidades de muestreo, georreferenciación de plagas/síntomas sospechosos, y registro de individuos trapeados (Pethybridge y Nelson, 2018; Pethybridge y Nelson, 2015). Esto conduce a la fragmentación excesiva de un problema fitosanitario en múltiples Apps, pero viables para VE tipo 1 y 2. En contraparte, una App genérica, sobrecargada de módulos y opciones puede resultar compleja e impráctica. Por otra parte, la factibilidad técnica y conceptual para desarrollar una App orientada al usuario final, sin interactividad web, proyecta una idea tecnológica simplificada. En realidad, Apps para SVE tipo 3 deben concebirse para flujo bidireccional de datos referenciados en espacio-tiempo, vinculado a un sistema web de gestión fitosanitario y múltiples usuarios acreditados para registrar y recibir información estandarizada y sincrónica hacia / desde un entorno web (Figura 3 y 4) (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). Estas Apps tienen un fin epidemiológico y son más complejas conceptual y operativamente

and impractical. On the other hand, the technical and conceptual feasibility to develop an App oriented to end-users, without web interactivity, oversimplified the EES technological needs. In reality, Apps for ESS type 3 support must be conceived for bidirectional flow of data referenced in space-time, structured linked to its phytosanitary web platform with multiple accredited users to register and receive standardized and synchronous information to and from the web environment (Figure 3 and 4) (Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). These Apps have an epidemiological purpose and are conceptually and operationally complex (Drew *et al.*, 2020; Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). In other cases, such as Epicollect5 3.0.3, a pioneering generic application (Aanensen *et al.*, 2009), they are linked to a web environment for data integration and visualization, but they do not incorporate algorithms for decision-making.

ESS type 3 Apps are essential to record periodic data in real-time from extensive evaluations of variables associated with the *epidemiological system* in *n*-sites/regional production units preselected with quantitative inductivity criteria, ideally with statistical error estimates for technical auditability purposes (Acevedo-Sánchez *et al.*, 2017; Parnell *et al.*, 2017; Acevedo-Sánchez and Mora-Aguilera, 2016). Eventually, the structured collection of data storage hock to a web platform generates large volumes of data (i.e., structured big data), which are intervened by dynamic algorithms to generate descriptive graphic outputs, automated analysis, and development of actionability criteria for decisions making inherent to the ESS objective(s). A mobile application designed with an epidemiological approach also allows its implementation in ESS support research (Mendoza-Ramos *et al.*, 2021; López-Bautista *et al.*, 2020; Coria- Contreras *et al.*, 2019) and in risk communication by receiving alerts for decision-

(Drew *et al.*, 2020; Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). En otros casos, como en Epicollect5 3.0.3, una aplicación pionera genérica (Aanensen *et al.*, 2009), se vinculan a un entorno web para la integración y visualización de datos, pero no permiten la incorporación de algoritmos para tomas de decisiones.

Apps para SVE tipo 3 son esenciales para registrar datos periódicos en tiempo real a partir de evaluaciones extensivas de variables asociadas al sistema epidemiológico en *n*-sitios/unidades productivas regionales preseleccionadas con criterios cuantitativos de inductividad, idealmente con estimaciones de error estadístico con fines de auditabilidad técnica (Acevedo-Sánchez *et al.*, 2017; Parnell *et al.*, 2017; Acevedo-Sánchez y Mora-Aguilera, 2016). Eventualmente, el acopio estructurado de datos articulados a una plataforma web *ad hoc* genera grandes volúmenes de datos los cuales son intervenidos mediante algoritmos dinámicos para generar insumos gráficos descriptivos, análisis automatizados y desarrollo de criterios de accionabilidad para toma de decisiones inherentes al objetivo(s) de un SVE. Una aplicación móvil diseñada con un enfoque epidemiológico permite también su implementación en investigación de soporte (Mendoza-Ramos *et al.*, 2021; López-Bautista *et al.*, 2020; Coria-Contreras *et al.*, 2019), y en comunicación de riesgos mediante la recepción de alertas para toma de decisiones. App Alerta Café v. 2.0, disponible en *Play Store*, se implementó por tres años con este propósito (CP-LANREF, 2017. No Publicado). CP-LANREF generó las aplicaciones App-VEFCafé v4.7 y App-SIVEA v4.1 para SVEs de café (*C. arabica*) y agave (*Agave tequilana*), respectivamente, operados oficialmente por el ONPF (SENASICA-DGSV) (Cuadro 1). Estas aplicaciones permiten el registro de un total de 79 y 71 metadatos calendarizados, totalizando 103,242,764 y 35,664,551 registros en bases de datos web durante ocho y cinco años de

making. App Alerta Café v. 2.0, available in Play Store, was supported for three years with this purpose (CP-LANREF, 2017. Not published). CP-LANREF generated the applications App-VEFCafé v4.7 and App-SIVEA v4.1 for ESS of coffee (*C. arabica*) and agave crop (*Agave tequilana*), respectively, officially operated by the NPPO (SENASICA-DGSV) (Table 1). These applications allow the collection of a total of 79 and 71 scheduled metadata, totaling 103,242,764 and 35,664,551 database web records in eight and five years of implementation, respectively. Operational characteristics include ge positioning, user authentication, characterization of productive units, ID QR systems, pest damage assessment, pest density, plant phenology, etc. These guarantee standardization, timeliness, reliability, and regional representativeness of phytosanitary and productive data of the target crop. The Apps were developed for the Android® operating system (version 5 or higher for coffee and 6 – 8 for agave), articulated with web technologies and back-end programming languages (PHP, Nodejs, etc.) to generate web services for registering-sending data. They use relational databases with MySQL as the primary manager. Both Apps were extensively validated before ESS implementation, requiring adaptation for compatibility between mobile systems, automatic geographical verification of ge positioning, record retrieval, local historicity of data, etc.

These Apps are developed with a multifunctional, multivariate and multipest modular structure. App-SIVEA also allows the generation of epidemiological pre-alerts *in situ*. The metadata feed algorithms in the PVEF-Cafeto and SIVEA web platforms to generate preventive alerts of phytosanitary risks at a regional and sub-regional level for decision-making. The use of this type of Apps requires training, and they are for the exclusive use of accredited users. Other Apps

implementación, respectivamente. Características operativas incluyen geoposicionamiento, autenticación de usuarios, caracterización de unidades productivas, sistemas QR de identificación, y escalas de evaluación daño por plaga(s), fenología, etc., que garantizan estandarización, oportunidad, confiabilidad y representatividad regional de datos fitosanitarios y productivos del cultivo agrícola de interés. Las Apps fueron desarrolladas para el sistema operativo Android® (versión 5 o mayor para café y 6 - 8 para agave) articuladas con tecnologías web y lenguajes de programación asociadas al servidor (PHP, HTML, CSS, etc.) para generar servicios web de registro-envío de datos. Emplean bases de datos relacionales teniendo a MySQL como gestor principal. Ambas Apps se validaron extensivamente previa implementación SVE, requiriendo adecuación por compatibilidad entre sistemas móviles, verificación geográfica automática de georreferencias, recuperación de registros, historicidad local de datos, etc.

Estas Apps están desarrolladas con una estructura modular multifuncional, multivariada y multiplaga. App-SIVEA permite además generar pre-alertas epidemiológicas *in situ*. Los metadatos alimentan algoritmos en las plataformas PVEF-Cafeto y SIVEA para generar alertas preventivas de riesgos fitosanitarios a nivel regional y subregional para toma de decisiones. El uso de este tipo de Apps requiere entrenamiento y son de uso exclusivo para usuarios acreditados. Otras Apps, con propósitos fitosanitarios pueden ser genéricas y de uso libre. App-Monitor 4.0 de CP-LANREF se diseñó en soporte a diagnósticos epidemiológicos no extensivos. Permite configurar la escala de medición de daño y vigor de planta, evaluar hasta cinco plagas de interés y registrar la especie vegetal hospedera. Los datos generados son compatibles con formato MS Excel y son exportables desde distintas herramientas como e-mail, bluetooth y otras. Esta App también puede descargarse desde *Play Store*.

for phytosanitary purposes can be generic and free to use. CP-LANREF App-Monitor v. 4.0 was designed to support non-extensive epidemiological diagnoses. It allows setting the scale to assess pest(s) damage and plant vigor, evaluate up to five pests of interest, and register the host plant species. The data generated is compatible with MS Excel format and can be exported from different tools such as e-mail, Bluetooth, and others. This App can also be downloaded from Play Store.

After exhaustive validation under real conditions, the digital technology and support research results should be transferred to end-user directly on the field to assure data quality and adoption of the *holistic-systemic* philosophy explicit on the scientific-technological innovation. Such transference must include the implemented institutional and operative innovation models implying directives, protocols, functional roles, and programmed goals. Effective human talent management is fundamental for ESS type 3 success (Figure 2 and 3).

Algorithms applicability to metadata management and analyses

ESS type 3 requires integrating quantitative strategies to establish or support *preventive* and *protective* actionability criteria in pest management (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Acevedo-Sanchez *et al.*, 2017; Acevedo-Sanchez and Mora-Aguilera., 2016; Mora Aguilera *et al.*, 2015a,b; Mora-Aguilera *et al.*, 2014e). ES types 1 and 2 often rely on normative qualitative decisions (i.e., present/absent pest). In web-based ESS, quantitative strategies must generate solutions or algorithms programmable to automate the management and analyses of big structured data in real-time. In this context, a computer program is lines of code in a language suitable for the web environment, such as PHP, that solves a specific

Después de un proceso exhaustivo de validación en condiciones reales, la tecnología digital y la investigación de soporte generada para un SVE tipo 3 debe ser transferida al usuario final directamente en campo para asegurar calidad del dato y adopción de la filosofía *holística-sistémica* explícita en la innovación científica-tecnológica. Esta transferencia debe incluir el modelo de innovación operativo y el institucional/empresarial/productivo con énfasis en directrices, protocolos, roles funcionales y metas programáticas. La gestión efectiva del talento humano determina el éxito SVE web tipo 3 (Figura 2 y 3).

Aplicabilidad de algoritmos en la gestión y análisis de metadatos

SVE tipo 3 requiere la integración de estrategias cuantitativas para establecer o sustentar criterios de accionabilidad *preventivos* y *protectivos* en el manejo de plagas (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Acevedo-Sánchez *et al.*, 2017; Acevedo-Sánchez and Mora-Aguilera, 2016; Mora Aguilera *et al.*, 2015a, b; Mora-Aguilera *et al.*, 2014e). VE tipo 1 y 2 comúnmente emplean criterios normativos cualitativos (i.e., plaga presente/ausente). En SVE web, las estrategias cuantitativas deben generar soluciones o algoritmos programables para automatizar la gestión y análisis de grandes volúmenes de datos en tiempo real. En este contexto, un programa de computo son líneas de código en un lenguaje idóneo para entorno web, como PHP, que resuelve un problema específico de visualización gráfica, generación de reportes automáticos con análisis descriptivos y cálculo de criterios de accionabilidad define un algoritmo (Figura 5A). Un enfoque intuitivo para generar algoritmos ha sido el empleo de *modelos empíricos determinísticos* o *modelos estocásticos* recurrentes en la epidemiología clásica. Por ejemplo, para resolver la interrogante: ¿Cuál

problem of graphical visualization, generating automatic reports with descriptive analysis, and calculating actionability criteria define an algorithm (Figure 5A). An intuitive approach to generating algorithms has been using *empirical deterministic* or *stochastic models* recurrent in classical epidemiology. For example, to solve the question: What is the incidence of disease-*y* at time-*t*?, the following algorithm was generated using a stochastic or probabilistic model: $\hat{y} = 20.92 + 0.28x_1 - 0.20x_2 - 0.005x_3 + 0.09x_4 + 0.02x_5 + 0.05x_6$. Where x_1 - x_6 are climate variables measured with specialized equipment (Kuang *et al.*, 2012). In this case and others, using measurements of variables associated with a real problem determines the *empirical* nature of the model (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Coria-Contreras *et al.*, 2015b), as opposed to a *theoretical model* based on preconceived assumptions (Parnell *et al.*, 2017). Estimating parameters (e.g., 20.92, 0.28, etc.) with statistical assumptions establishes its stochastic character. With a systemic web ESS based on big structured data, in addition to this type of *numerical algorithms*, a set of *relational algorithms* is required, that is, those that allow relating categories of metadata for big data management (Mora-Aguilera *et al.*, 2014d).

Effective data management through user-defined multi-criteria options acquires powerful relevance in visualizing interrelationships among *epidemiological system* components and understanding its effect on pest intensity changes in time and space. The transference of web-based ESS to end-users with different technical profiles has shown that *relational algorithms* better understand functional interrelationships among variables and provide the epidemiological bases to comprehend actionability criteria (CP-LAREF. Unpublished). For example, graphically observing the numerical progression of young coffee leaves

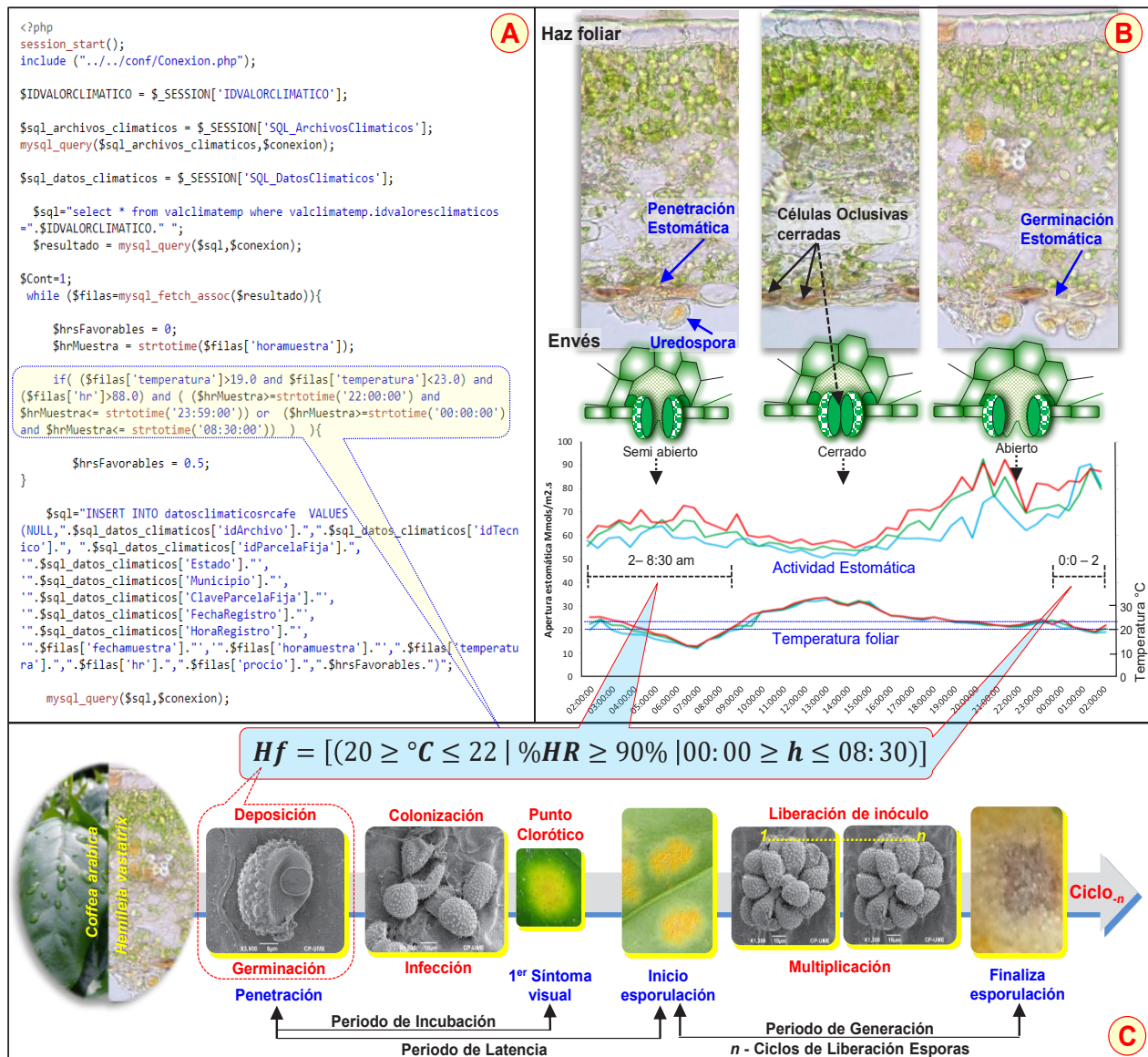


Figura 5. Programación web en PHP de un *algoritmo numérico dinámico* para el cálculo del *número de horas favorables (Hf)* para la germinación de esporas de *H. vastatrix* aplicable en alertas tempranas de focos regionales de roya del café. La sección enmarcada hace referencia al código de programación específico a la función numérica del recuadro azul (A). Actividad estomática y temperatura foliar en *C. arabica* var. Caturra empleada para definir el rango de horas (*h*)(0-8:30) de estoma abierto para contabilizar horas de temperatura ($^{\circ}\text{C}$) y humedad relativa (*HR*) aptas para la germinación (B). Ciclo de patógenesis de *H. vastatrix*. El recuadro punteado rojo indica la fase seleccionada para estimar riesgos de infección (C).

Figure 5. Web programming in PHP to calculate the number of favorable hours (*FH*), a *dynamic numerical algorithm*, for spore germination of *H. vastatrix* applicable in early warning of regional outbreaks of coffee rust. The framed section refers to the programming code specific to the numeric function in the blue box (A). Stomata activity and leaf temperature in *C. arabica* var. Caturra used to define the range of hours (*h*) (0-8:30) of open stoma to count hours of temperature ($^{\circ}\text{C}$) and relative humidity (*RH*) suitable for germination (B). Pathogenesis cycle of *H. vastatrix*. The red dotted box indicates the phase selected for infection risk estimations (C).

es la incidencia de enfermedad- y en un tiempo- t ?, se generó el siguiente algoritmo mediante un modelo estocástico o probabilístico: $\hat{y} = 20.92 + 0.28x_1 - 0.20x_2 - 0.005x_3 + 0.09x_4 + 0.02x_5 + 0.05x_6$. Donde x_1-x_6 son variables de clima medidas con equipo especializado (Kuang *et al.*, 2012). En este caso, el empleo de mediciones de variables asociadas a un problema real determina el carácter *empírico* del modelo (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Coria-Contreras *et al.*, 2015b), en oposición a un *modelo teórico*, el cual se basa en asunciones preconcebidas (Parnell *et al.*, 2017). La estimación de parámetros (i.e., 20.92, 0.28, etc.) con supuestos estadísticos establece su carácter estocástico. Con un SVE sistémico basado en grandes volúmenes de datos se requiere además de este tipo de *algoritmos numéricos*, un conjunto de *algoritmos relacionales*, es decir aquellos que permiten relacionar categorías de metadatos para gestión de grandes bases de datos (Mora-Aguilera *et al.*, 2014d)

La gestión efectiva de datos mediante opciones multi-criterio definidas por el usuario adquiere una poderosa relevancia en la visualización de interrelaciones entre variables asociadas al *sistema epidemiológico* y su efecto en cambios de intensidad de plaga en tiempo y espacio. La transferencia de SVE web a usuarios con diferente perfil técnico ha demostrado que los *algoritmos relacionales* permiten la fácil comprensión de interrelaciones funcionales entre variables y aporta bases epidemiológicas para entender los criterios de accionabilidad (CP-LAREF. No publicado). Por ejemplo, observar gráficamente la progresión numérica de hojas jóvenes de cafeto (*subsistema Planta*) respecto al número de hojas con lesiones causadas por *H. vastatrix* (*subsistema Patógeno*), permite entender la relación tejido susceptible con disponibilidad de inóculo para desencadenar un proceso infectivo. Los algoritmos que posibilitan esto son predominantemente *relacionales* y están condicionados

(*Plant subsystem*) concerning the number of leaves with lesions caused by *H. vastatrix* (*Pathogen subsystem*) allows us to understand the relationship between susceptible tissue and inoculum availability to trigger an infective process. The algorithms that enable this are predominantly *relational* and are conditioned to the proper and planned selection of variables, frequency, and spatial distribution of measurements. ESS support research provides this kind of information (Mendoza-Ramos *et al.*, 2021; López-Bautista *et al.*, 2020; Acevedo-Sánchez and Mora-Aguilera, 2016; Mora-Aguilera *et al.*, 2016b; Mendoza-Ramos *et al.*, 2015a, b). Logically, a *numerical algorithm* must also be programmed to automate decision rules. However, its origin and conception were part of quantitative modeling (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Kuang *et al.*, 2012).

These algorithms are critical in the automation of web-based ESS type 3 due to their direct link with the criterion(s) of actionability or epidemiological alerts. Note that field data, even more acute with real-time transfer with ESS Apps, are dynamic by their very nature. Nevertheless, this is not necessarily represented by the *numerical algorithm*. These can be *dynamic or static* in terms of their numerical structure or due to parameter calculation. A *dynamic* or ‘intelligent’ *numerical algorithm* is mainly based on *epidemic indices* that are desirable due to their sensitivity to detect spatio-temporal changes without depending on absolute parameters, which is the case of a *static numerical algorithm*. These, in general, has a local application and is temporally restricted (i.e., β_i of a model like the one previously described in the form $\hat{y} = \beta_0 + \beta_1x_1 + \varepsilon$). In PVEF-Cafeto, 20 algorithms based on *epidemic indices* and *indicators* were programmed. For example, the algorithm for calculating the number of hours favorable for *H. vastatrix* infection was based on specific temperature (20-22 °C) and relative humidity

a la pertinente y planeada selección de variables, frecuencia y distribución espacial de mediciones. Líneas de investigación de soporte SVE proporcionan esta de información (Mendoza-Ramos *et al.*, 2021; López-Bautista *et al.*, 2020; Acevedo-Sánchez and Mora-Aguilera. 2016; Mora-Aguilera *et al.*, 2016b; Mendoza-Ramos *et al.*, 2015a, b). Lógicamente, un *algoritmo numérico* también debe programarse para automatizar reglas de decisión en un entorno web. Pero su origen y concepción fue parte de una modelación cuantitativa (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Kuang *et al.*, 2012).

Este tipo de algoritmos son críticos en la automatización de un SVE debido a su vinculación directa con el criterio(s) de accionabilidad o de alerta temprana. Notar que el dato de campo, aún más acentuado por su transferencia en tiempo real con SVE Apps, es dinámico por su propia naturaleza. Pero esto no es necesariamente expresado por un *algoritmo numérico*. Estos pueden ser *dinámicos* o *estáticos* en cuanto a su estructura numérica o al cálculo de parámetros. Un *algoritmo numérico dinámico* o ‘inteligente’ se basa principalmente en *índices epidémicos* los cuales son deseables por su sensibilidad para detectar cambios espacio-temporales sin depender de parámetros absolutos, como es el caso de un *algoritmo numérico estático*. Estos generalmente tienen una aplicación local y temporalmente restringida (i.e., β_i de un modelo como el previamente descrito de la forma $\hat{y} = \beta_o + \beta_i x_i + \epsilon$). En el SVE para café se programaron un total de 20 algoritmos basados en *índices e indicadores epidémicos* (CP-LANREF, No Publicado). Por ejemplo, el algoritmo para el cálculo *número horas favorables* para la infección de *H. vastatrix* se basó en temperatura (20-22 °C) y humedad relativa (> 90%) específicas exhibidas entre las 0:00 y 8:30 am (Santana-Peñaloza *et al.*, 2015) (Figura 5). Estas condiciones constituyen rangos funcionales biológicos asociados a germinación de esporas

(> 90%) exhibited between 0:00 and 8:30 a.m. (Santana-Peñaloza, *et al.* 2015) (Figure 5). These conditions constitute functional biological ranges associated with spore *germination* and stomata *penetration* of the fungus (Figure 5B). Such “early” events of the pathogenesis are suitable for purpose of alerts regarding infection risks (Figure 5B, C). The mechanistic understanding of this process implied determining the pathogenesis cycle, complemented with lesion expansion / uredospore density, in different coffee varieties and thermal regimes (Figure 5C). Additionally, studies were carried out with scanning electron (JSM 6390) and light (40x Carl Zeiss) microscopy to determine the uredospore aerodynamic morphology, its germination process and the stomata density in field plant material (Figure 5B). Thus, Figure 5B shows, in transverse foliar sections of *C. arabica* var. Bourbon, the stomata penetration of the germ tube of the fungus. The graph shows the effective stomata opening hours in var. Caturra (Handheld SC-1 Leaf Porometer) in young (blue line), mature (green) and old (red) leaves in order to specify the leaf-age most receptive to penetration / infection (CP-LANREF. Not Published). This type of research demonstrates the scientific foundation required to support an actionability algorithm. The *holistic-systemic* ESS cannot be intuitive and requires comprehensive research according to the region where it is intended. The automatic result of this algorithm is graphically displayed in the PVEF-Cafeto web interface in the next section.

PVEF-Cafeto did not include any algorithm developed with classical epidemiological models or general probabilistic models based on temporal incidence trends (Mora-Aguilera *et al.*, 2016b; Mora-Aguilera *et al.*, 2015a; Mora-Aguilera *et al.*, 2014e). In contrast, in ESS agave (Table 1), subregional algorithms obtained from an exhaustive analysis of regional historical data using

y penetración estomática del hongo, eventos ‘tempranos’ de la patogénesis aptos con fines de alertas respecto a riesgos de infección (Figura 5B, C). La comprensión mecanística de este proceso implicó determinar el ciclo de patogénesis complementado con expansión de lesión / densidad de uredosporas en diferentes variedades de café y régimen térmicos (Figura 5C). Adicionalmente, se realizaron estudios con microscopía electrónica de barrido (JSM 6390) y compuesto (40x Carl Zeiss) para conocer la morfología aerodinámica de la uredospora, su proceso germinativo y la densidad estomática en material vegetal de campo (Figura 5B). Así, la Figura 5B muestra, en cortes foliares transversales de *C. arabica* var. Bourbon, la penetración estomática del tubo germinativo del hongo. La gráfica exhibe las horas efectivas de apertura estomática determinadas en var. Caturra (Handheld SC-1 Leaf Porometer) en hojas jóvenes (línea azul), maduras (verde) y viejas (rojo) con el fin de precisar la edad foliar más receptiva a la penetración / infección (CP-LANREF. No Publicado). Este tipo de investigación demuestra el fundamento científico requerido para sustentar un algoritmo de accionabilidad. El SVE *holístico-sistémico* no puede ser intuitivo y demanda investigación acorde a la realidad regional donde éste será implementado. El resultado automático de este algoritmo se muestra gráficamente en la interfaz web PVEF-Cafeto en la siguiente sección.

PVEF-Cafeto no incluyó ningún algoritmo desarrollado con modelos epidemiológicos clásicos o modelos probabilísticos generales, basados por ejemplo en la tendencia temporal de incidencia (Mora-Aguilera *et al.*, 2016b; Mora-Aguilera *et al.*, 2015a; Mora-Aguilera *et al.*, 2014e). En contraste, en SVE para agave se programaron algoritmos sub-regionales obtenidos a partir de exhaustivos análisis de datos históricos regionales (2016-2019) mediante modelos de regresión múltiple ajustados con

multiple regression models adjusted with SAS (Statistical Analyzes System) were programmed for the calculation of agave weevil infestations (*Scyphophorus acupunctatus*, Coleoptera: Curculionidae). The relational for this stochastic modeling was the steady temporal density peaks and local pest spreading (CP-LANREF. Not published). Thus, such an approach is not recommended for highly sensible pests to slight variations on the *epidemiological system*, as in *H. vastatrix* – *C. arabica* (Coria-Contreras *et al.*, 2015b). However, if this approach is required, statistical adjustment of these models can be carried out directly in special web modules, which allows streamlining the temporal recalculation of these algorithms (Kuang *et al.*, 2012). As in the coffee ESS, in agave, *dynamic numerical algorithms* were also included.

Consequently, a web-based ESS is not restrictive in type and number of algorithms. Instead, depending on the systemic complexity of the phytosanitary problem (Figure 2). Another type of algorithms with great potential in web-based ESS, mainly with big structured data, is derived from *automated machine learning* with two main trends: *support vector machines* and *artificial neural networks* (Kaundal *et al.*, 2006). However, the use of these algorithms has been limited and oriented mainly to disease diagnosis and severity assessments (Golhani *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2018).

In the *holistic-systemic* conception, a web-based ESS can be conceived as a complex system of *dynamic modeling programming* where time and space are included in the intrinsic calculations of *n-numerical* and *n-relational* algorithms. It allows to understand and analyze interactions among variables and subsystems of the *epidemiological system* in addition to automatic outputs of early risk alerts or forecasts for regional decision making (Figure 1, 4, and 5).

SAS (Statistical Analyses System), para el cálculo de infestaciones de picudo del agave (*Scyphophorus acupunctatus*, Coleoptera: Curculionidae). La racionalidad de estos modelos estocásticos fue la estabilidad temporal de picos poblacionales y la fuerte dispersión local (CP-LANREF. No publicado). Consecuentemente, este enfoque no es recomendable para plagas muy sensibles a variaciones del sistema epidemiológico como en *H. vastatrix* – *C. arabica* (Coria-Contreras *et al.*, 2015b). Operativamente, el ajuste estadístico de éstos modelos puede realizarse directamente en módulos web especiales, lo cual permite dinamizar el recálculo temporal de estos algoritmos (Kuang *et al.*, 2012). Al igual que en SVE cafeto, en agave también se incluyeron algoritmos numéricos dinámicos. Consecuentemente, un SVE web no es restrictivo en tipo y número de algoritmos. Estos dependen de la complejidad sistémica del problema fitosanitario (Figura 2). Otro tipo de algoritmos con gran potencial aplicativo en SVE web, principalmente con datos masivos, se basan en aprendizaje automatizado con dos principales tendencias: máquinas de vector soporte y red neuronal artificial (Kaundal *et al.*, 2006). Sin embargo, estos algoritmos se han limitado y orientado principalmente al diagnóstico de enfermedades y evaluación de severidad foliar (Golhani *et al.*, 2018; Ma *et al.*, 2018).

En la concepción holística-sistémica, un SVE web puede ser concebido como un sistema complejo de modelación - programación dinámica donde tiempo y espacio están incluidos en los cálculos intrínsecos de *n*-algoritmos numéricos y *n*-relacionales permitiendo comprender y analizar interacciones entre variables y subsistemas del sistema epidemiológico, además de la generación automática de alertas tempranas de riesgo o pronósticos para tomas de decisiones regionales (Figura 1, 4 y 5).

Epidemiological Surveillance System type 3 applied to coffee rust

Epidemic increase of *Hemileia vastatrix*. The causal agent of coffee rust, *H. vastatrix*, was detected in the 1980's in Mexico. The fungus was established in coffee-growing areas at a sub-endemic level without economic consequences (SENASICA, 2016). However, between 2007 and 2012, the increase in epidemic intensity in Central America and southeastern Mexico alerted the productive coffee sector and NPPOs. In 2012, a regional epidemiological diagnosis evidenced the socioeconomic risk due to the distribution, incidence, and severity of the disease; predominant inventory of *Coffea arabica* varieties susceptible to the fungus; and plantations aged over 20 years with limited agronomic management in an estimated 639,000 ha (SIAP, 2018; Acevedo-Sánchez *et al.*, 2015). With these backgrounds, the Directorate General of Plant Health (DGSV in Spanish) and the Laboratory for Analysis of Phytosanitary Epidemiological Risk of COLPOS (CP-LANREF) conceived a type 3 web-based ESS which was called Program for the Epidemiological and Phytosanitary Surveillance of Coffee (PVEF-Cafeto, in Spanish). The Program was established in 2013 with a strategy of gradual coverage to all coffee growing areas (Mora-Aguilera *et al.*, 2014d). The objectives of the PVEF-Cafeto were: A) Develop a web-based ESS that would allow precision and real-time information on the epidemic status of coffee rust, climatic inductivity, phenology dynamics, and productive management; B) Generate regional models for epidemic risk alerts and epidemiological indicators to design preventive and protective action strategies for decision-makers at the federal,

Sistema de Vigilancia Epidemiológico tipo 3 aplicado a la roya del café

Incremento epidémico de *Hemileia vastatrix*. El agente causal de la roya del café, *H. vastatrix*, se detectó en los 80's en México. El hongo se estableció en zonas cafetaleras a nivel subendémico sin consecuencias económicas (SENASICA, 2016). Sin embargo, entre 2007 y 2012, el incremento de intensidad epidémica en Centroamérica y sureste de México alertó al sector productivo cafetalero y ONPFs. En 2012, un diagnóstico epidemiológico regional evidenció el riesgo socioeconómico debido a la distribución, incidencia y severidad de la enfermedad; inventario predominante de variedades de *Coffea arabica* susceptibles al hongo; y plantaciones envejecidas con edad superior a 20 años con limitado manejo agronómico en un estimado de 639 000 ha (SIAP, 2018; Acevedo-Sánchez *et al.*, 2015). Con este sustento, la Dirección General de Sanidad Vegetal (DGSV) y el Laboratorio de Análisis de Riesgo Epidemiológico Fitosanitario del COLPOS (CP-LANREF) concibieron un SVE tipo 3 en interfaz web, el cual se denominó Programa de Vigilancia Epidemiológico Fitosanitario del Café (PVEF-Café). El Programa se estableció en 2013 con una estrategia de cobertura gradual a la totalidad de zonas cafetaleras (Mora-Aguilera *et al.*, 2014d). Los objetivos del PVEF-Café fueron: A) Desarrollar un SVE que permitiera conocer con precisión y en tiempo real el estatus epidémico de la roya del café, inductividad climática, dinámica fenológica y manejo productivo; B) Generar modelos regionales de alertas de riesgo epidémico e indicadores epidemiológicos para diseñar estrategias de accionabilidad *preventiva* y *protectiva* orientadas a tomadores de decisión a niveles federal, estatal y productivo; y C) Incorporar gradualmente

state, and productive levels; and (C) Gradually incorporate *n*-pests of the coffee plant of quarantine and economic importance to support a *holistic-systemic* phytosanitary model with the plant (crop) as the integrating axis of a novel epidemiology system (Figure 1).

Characteristics of the PVEF-Café. The PVEF-Café is a web-based ESS type 3, designed to automate risk management, analysis, and communication processes in a web environment (Mora-Aguilera *et al.*, 2015a, b; Coria-Contreras *et al.*, 2015a; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d). The classic paradigm of monitoring specific pests was transformed into an integrative and *holistic-systemic* one based on a novel *epidemiological system* with the plant as the production and phytosanitary process (Figure 1 and 6). The ESS was conceived to mitigate the potential impact of coffee rust with predominantly *preventive* regional actions. The PVEF-Café web architecture is multi-modular with public and private access interfaces (Figure 7 and 8).

Public and private web access. The public interface reveals the operational status of the surveillance in real-time (Figure 7A) and the epidemic status of rust through official reports and weekly phytosanitary alerts (Figure 7B). Similarly, protocols, methodological videos, and operational manuals can be freely consulted. This enables technical audits and the eventual harmonization of the ESS with other NPPOs (Figure 7C). The private interface allows accredited users to view automatic subregional maps and graphs with the highest epidemic risk in a period-*i* or configure queries generating specific spatial and/or temporal outputs.

n-plagas del café de importancia cuarentenaria y económica para sustentar un modelo holístico-sistémico fitosanitario con la planta (cultivo) como eje integrador de un novel *sistema epidemiológico*.

Características del PVEF-Cafeto. El PVEF-Cafeto es un SVE web tipo 3, diseñado para automatizar procesos de gestión, análisis y comunicación de riesgos en un entorno Web (Coria-Contreras *et al.*, 2015a; Mora-Aguilera *et al.*, 2015a, b; Mora-Aguilera *et al.*, 2014d). El paradigma clásico del monitoreo de plagas específicas se transformó a uno integrador *holístico-sistémico* con base en un *sistema epidemiológico* con el cultivo como eje central del proceso productivo y fitosanitario (Figura 1 y 6). El SVE se concibió para mitigar el impacto potencial de la roya de café con acciones regionales predominantemente *preventivas*. La arquitectura web del PVEF-Cafeto es multimodular con interfaces de acceso público y privado (Figuras 7 y 8).

Acceso web público y privado. La interfaz pública trasparencia el estatus operativo de la vigilancia en tiempo real (Figura 7A) y la condición epidémica de la roya por medio de reportes oficiales y alertas fitosanitarias semanales (Figura 7B). Similarmente, pueden consultarse libremente protocolos, videos metodológicos y manuales operativos. Esto posibilita auditorías de carácter técnico y la eventual armonización del SVE con otros ONPF (Figura 7C). La interfaz privada permite a usuarios acreditados visualizar mapas y gráficas subregionales automáticas con el mayor riesgo epidémico en un periodo-*i* o configurar consultas específicas que generan gráficas espaciales y/o temporales.

Instrumentos de Vigilancia en la sección privada: Mapas. La Figura 8 ilustra el módulo de *Instrumentos de Vigilancia*, el cual automáticamente muestra espacialmente la **Condición Fitosanitaria**

Surveillance Instruments in private section: Maps. Figure 8 illustrates the *Surveillance Instruments* module, which automatically shows spatially the **Phytosanitary Condition** of Veracruz, one of the most important Mexican coffee states, with municipal divisions colored by the level of damage caused by coffee rust on a scale of 0 - 70% (**Classes**) (Figure 8A). The lack of orange or red color indicates that there are no subregions that require mitigation actions in the current stage of the production cycle since the maximum average severity range was 4 - 15%. Areas that require and implement rust mitigation can be viewed in the **RCA** option (Regional Control Areas). The correct box is a pest selector that changes the map accordingly (Figure 8A). Other custom options are shown in the top menu.

Surveillance Instruments in private section: Temporal dynamics. In Figure 8B, the municipalities of Veracruz that are most inductive to coffee rust (Tepetlán, Teocelo, and Altotonga) at the current stage of the production cycle are automatically shown with temporal traceability to previous cycles (2016-2021). The red bars in the lower box represent at weekly/month interval the *number of favorable hours* (FH) for *H. vastatrix* infection associated with the epidemic process of the most inductive municipality (Teocelo) (Figure 8C), automatically calculated with a *dynamic numerical algorithm* (Figure 5). Below FH bars, actual continuous temperature and relative humidity (blue line) can also be exhibited upon selection. This climatic data is obtained from coffee field sensors strategically distributed in a subregion. Ellipses and superimposed red arrows represent the exploratory association of differential inductive epidemic effect of a sustained interval of FH between May and August, with an increase in rust severity in Teocelo between August and late



Figura 6. Subsistemas *Planta - Plaga* asociado a PVEF-Cafeto (Figura 7). La *Planta* de cafeto constituye el eje de integración fitosanitaria y es el centro del novel *Sistema Epidemiológico* propuesto para SVE tipo 3 (Figura 1). Línea punteada exterior azul resalta las plagas de importancia cuarentenaria de interés para México. La línea punteada negra destaca plagas prevalentes de importancia económica. PVEF-Cafeto permite vigilar cambios de intensidad epidémica / incursión de patógenos, nematodos, insectos y ácaros acorde con el enfoque SVE *holístico-sistémico* aplicado a la *prevención y protección* de plagas.

Figure 6. *Plant - Pest* subsystems associated with PVEF-Cafeto (Figure 7). The coffee *Plant* constitutes the axis of phytosanitary integration, and the center of the novel *Epidemiological System* proposed for ESS type 3 (Figure 1). Blue outer dotted line highlights pests of quarantine importance of interest to Mexico. The black dotted line highlights prevalent pests of economic importance. PVEF-Cafeto allows surveillance of epidemic intensity changes / incursion of pathogens, nematodes, insects and mites according to a *holistic-systemic* ESS approach applied to pest *prevention and protection*.

Figura 7. Interfaz web para visualizar información de interés público del Programa de Vigilancia Epidemiológico del Cafeeto (PVEF-Cafeto). Sección de representación del estatus en tiempo real del muestreo (puntos azules) y monitoreo (puntos rojos) sincrónico de plagas del cafeeto (Figura 6). El usuario puede personalizar el mapa con opciones del menú 'Mas +' (A). Sección de consulta de comunicación de riesgos: Boletines epidemiológicos y Alertas fitosanitarias. En recuadro inferior se indican algunos elementos informativos dinámicos de tipo operativo, metodológico y fitosanitario (B). Sección especializada para personal responsable del muestreo y monitoreo en campo, oficiales ONPF e investigadores acreditados (C).

Figure 7. Web interface for viewing information of public interest from the Coffee Epidemiological Surveillance Program (PVEF-Cafeto). Section shows real-time synchronic sampling status (blue points) and monitoring (red points) of coffee pests (Figure 6). The user can customize the map with options of the menu 'Mas +' (A). Query section for risk communication releases: Epidemiological bulletins and phytosanitary alerts. Some informational elements of operational, methodological, and phytosanitary nature are indicated in lower dynamic boxes (B). Specialized section for those responsible for sampling and monitoring in the field, ONPF's officials, and accredited researchers (C).

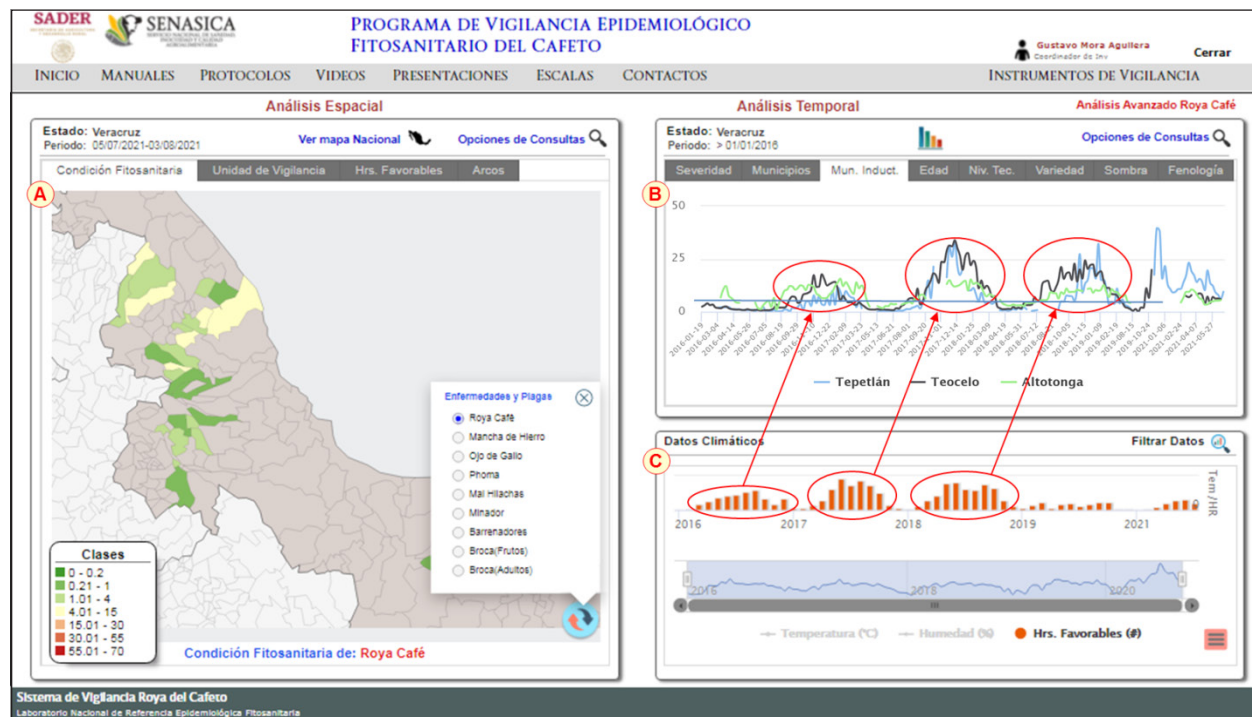


Figura 8. Interfaz web para consulta privada de módulos avanzados de análisis epidemiológicos automatizados en PVEF-Cafeto. Se visualiza el módulo de *Instrumentos de Vigilancia*. Sección *espacial* con *Opciones de Consulta* personalizada espacio-tiempo, tipo de plaga y escala de daño para generar mapas estatales o nacionales de riesgo-prevalencia (A). Sección *temporal* con *Opciones de Consulta* análogas (B) y Sección *temporal* de monitoreo climático para cálculo de algoritmos de inductividad (C), (Figura 5). Otras explicaciones generales del menú superior en Figura 7.

Figure 8. Web interface for private consultation of advanced modules for automated epidemiological analyses in PVEF-Cafeto. The *Surveillance Instruments* module is displayed. *Spatial* section with custom space-time, pest type, and damage scale query options to generate state or national risk-prevalence maps (A). *Temporal* section has options for analogous queries (B) and the *Temporal* section of climate monitoring for calculating inductivity algorithms (C), (Figure 5). Other general *menu* explanations on Figure 7.

de Veracruz, uno de los estados cafetaleros mexicanos más importantes, con divisiones municipales coloreados por nivel de daño, causado por la roya del café en una escala de 0 - 70% (**Clases**) (Figura 8A). Ausencia de color naranja o rojo indica que no existen subregiones que requieran acciones de mitigación al estatus actual del ciclo productivo ya que el rango de severidad promedio máximo es de 4 - 15% (amarillo). Áreas que requieren y realizan mitigación para roya se pueden visualizar en la opción **Arcos** (Áreas Regionales de Control). El

December (maximum), in three coffee productive cycles. The time lag represents the effect of incubation and latency period (*lag*) on the fungus infection (Figure 5). Data and graphs can be exported to generate user customize reports.

Analytical algorithms. Descriptive analyses are automatically generated with *relational algorithms* and allow for online epidemiological diagnoses and advanced reports. Rust alerts, at weekly intervals, are intended to determine

recuadro derecho es un selector de plaga que cambia concordantemente el mapa (Figura 8A). Otras opciones personalizadas se muestran en menú superior.

Instrumentos de Vigilancia en la sección privada: Dinámicas temporales. En la Figura 8B, automáticamente se muestran los municipios de Veracruz más inductivos a la roya del cafeto (Tepetlán, Teocelo y Altotonga) al avance del ciclo productivo actual con trazabilidad temporal a ciclos previos (2016-2021). Las barras rojas del recuadro inferior representan a intervalo semanal/mensual el *número de horas favorables* (HF) para infección de *H. vastatrix* asociado al proceso epidémico del municipio más inductivo (Teocelo) (Figura 8C), calculados automáticamente con un *algoritmo numérico dinámico* (Figura 5). Bajo las barras HF, líneas continuas (azul) de temperatura y humedad relativa pueden opcionalmente mostrarse. Estos insumos climáticos son generados a partir de sensores a nivel de plantaciones de café estratégicamente distribuidos en una subregión. Elipses y flechas roja sobrepuestas representan la asociación exploratoria del efecto diferencial inductivo epidémico de un intervalo sostenido de HF entre mayo-septiembre con un incremento de severidad de roya en Teocelo entre mitad de agosto y finales de diciembre (nivel máximo) en tres ciclos productivos de café. El desfasamiento de tiempo representa el efecto del periodo de incubación y latencia (*lag*) en la infección del hongo (Figura 5). Los datos y gráficas pueden ser exportables para generar reportes personalizados.

Algoritmos analíticos. Los análisis descriptivos son generados automáticamente con *algoritmos relacionales* y permiten realizar diagnósticos epidemiológicos en línea y elaborar reportes avanzados. Las alertas a roya, a intervalos semanales, tienen

differentiated risks, at the municipality level, in the formation of regional foci; typify the epidemic process as an *early* or *late* focus, or as an *active* epidemic (regional dispersion); and define the actionability criteria for mitigation with *preventive* or *protective* products previously evaluated (Mendoza-Ramos *et al.*, 2015b). Risk analyses, also automated, are generated with *dynamic quantitative algorithms* (Figure 5).

Continuous innovation. PVEF-Cafeto, an ESS type 3, had a dynamic and continuous scientific-technological innovation. Thus, as examples, algorithm adjustments were made for the gradual integration of 10 pests of economic importance and nine under quarantine to monitor a total of 19 pests (Figure 6). A regional monitoring module of varietal resistance to *H. vastatrix* was integrated, and the module to calculate favorable hours of climatic inductivity was optimized to include *n*-pests, such as the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytinae). These pests can also be analyzed online with criteria analogous to rust. A PVEF-Cafeto multi-pest conferred integrality technological, optimized general resources, and was highly influential in the traceability of phytosanitary risks.

Implementation and operability. PVEF-Cafeto operated from 2013 to 2019 through duly trained technical personnel from the Plant Health State Committees (CESV in Spanish), contributing to the NPPO. It ended once the coffee rust problem was regionally mitigated in 11 coffee-producing states, but it keeps its historical databases on the webserver. It included a total of 240 municipalities selected with criteria of epidemic inductivity (Acevedo-Sánchez *et al.*, 2016), which represented 85% of the country's coffee-growing area. The management of regional foci of rust showed its

como propósito determinar riesgos diferenciados, a nivel municipio, en la conformación de focos regionales; tipificar el proceso epidémico como foco temprano o tardío, y epidemia activa (dispersión regional); y definir los criterios de accionabilidad para mitigación con productos *preventivos* y/o *protectivos* previamente evaluados en campo (Mendoza-Ramos *et al.*, 2015b). Estos análisis de riesgo, también automatizados, se generan con *algoritmos cuantitativos dinámicos* (Figura 5).

Innovación continua. PVEF-cafeto, en concordancia con un SVE tipo 3, tuvo un desarrollo de innovación científica-tecnológica dinámica y continua. Así, por ejemplo, se realizaron adecuaciones de algoritmos para gradual integración de 10 plagas de importancia económica y nueve cuarentenarias para vigilar un total de 19 plagas (Figura 6); se integró un módulo de monitoreo regional de la resistencia varietal a *H. vastatrix*; y se optimizó el módulo para cálculo de horas favorables de inductividad climática de *n*-plagas insectiles como la broca del café *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytinae). Estas plagas también pueden ser analizadas en línea con criterios análogos a la roya. La condición multiplaga de PVEF-cafeto confirió integralidad tecnológica, optimizó recursos generales y fue altamente efectivo en trazabilidad de riesgos fitosanitarios.

Implementación y operatividad. PVEF-Cafeto operó de 2013 a 2019 mediante personal técnico debidamente capacitado de Comités Estatales de Sanidad Vegetal (CESV), entidad coadyuvante del ONPF. Finalizó una vez que se logró mitigar regionalmente el problema de roya del café en 11 entidades productoras de café, pero conserva sus bases de datos históricas en servidor web. Incluyó un total de 240 municipios seleccionados con criterios de inductividad epidémica (Acevedo-Sánchez y Mora-Aguilera 2016), los cuales representaron el

effectiveness by gradually reducing the leaf severity and prevalence regarding the 2013 outbreak (Acevedo-Sánchez *et al.*, 2015), reaching since 2017 low epidemic intensity levels. Thus the state average in June 2017 exhibited 8% plant severity and 5% leaf severity. Subregionally (municipality), there was 20% ($\pm 8\%$) of average plant severity and 6% ($\pm 3\%$) of leaf severity. The epidemic trends of the most inductive municipalities, in general, remained constant with low levels (severity $<5\%$). No additional pests had actionable risk levels, and any pests of quarantine interest were detected during the referred period. However, the digital architecture and operational model of PVEF-Cafeto allows its rapid reactivation (1-3 months) in the event of any phytosanitary emergency. Thus, from the 2020 production cycle to the present, PVEF-Cafeto operates for preventive purposes in Veracruz with 12 technicians attached to the CESV and the technical-scientific support from CP-LANREF. The PVEF-Cafeto has structured big phytosanitary data with 15,773,140 records comprised of 199,660 field evaluations, including pest damage, phenology, and agronomical managements weekly/biweekly intervals; and 87,469,624 climatic records from Temperature / RH sensors established *in situ*. This big structured data is the basis for phytosanitary management in time-space, establishing actionable criteria and generating phytosanitary alerts at different time horizons (Figure 7 and 8). PVEF-Cafeto was awarded for its technological-scientific innovation by the National Council of Science and Technology of Mexico CONACYT (INNOVATIS 2018) and the Inter-American Institute for Cooperation in Agriculture IICA (INNOVAGRO, 2016).

PERSPECTIVES

In its *holistic-systemic* conception, epidemiological surveillance represents the future

85% de la superficie cafetalera del país. El manejo de focos regionales de la roya mostró su efectividad al reducir gradualmente severidad foliar y prevalencia respecto al brote 2013 (Acevedo-Sánchez *et al.*, 2015), lográndose desde 2017 niveles de baja intensidad epidémica. Así, el promedio estatal en junio 2017 exhibió 8% de severidad en planta y 5% de severidad foliar. Subregionalmente (municipal), se tuvo un 20% ($\pm 8\%$) de severidad en planta promedio y 6% ($\pm 3\%$) de severidad foliar. Las tendencias epidémicas de los municipios más inductivos, en general se mantuvieron constantes con niveles bajos (Severidad < 5%). Ninguna plaga adicional tuvo niveles de riesgo accionables y no se detectaron plagas de interés cuarentenario durante el periodo referido. Sin embargo, la arquitectura digital y modelo operativo de PVEF-Cafeto permite su rápida reactivación (1-3 meses) ante una emergencia fitosanitaria. Así, del ciclo productivo 2020 al presente, PVEF-Cafeto opera con fines preventivos en Veracruz con 12 técnicos adscritos al CESV y con soporte técnico-científico de CP-LANREF. El PVEF-cafeto posee un gran volumen de datos fitosanitarios con 15,773,140 registros provenientes de 199,660 evaluaciones de campo, incluyendo daño de plagas, fenología y manejo agronómico, a intervalos semanales y quincenales; y 87,469,624 registros climáticos provenientes de sensores de Temperatura / HR establecidos *in situ*. Este 'big-data' estructurado es base para la gestión fitosanitaria en tiempo-espacio, establecer criterios de accionabilidad y generar alertas fitosanitarias a diferentes horizontes de tiempo (Figura 7 y 8). PVEF-Cafeto fue premiado por su innovación técnico-científica por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México, CONACYT (INNOVATIS, 2018), y por el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA (INNOVAGRO, 2016).

of plant health applied to risk mitigation. The speed of epidemic processes at a global level has escalated in time and space. Classic field management is becoming less efficient and profitable in environmental terms and productive assets, forcing regional strategies. Mobility and increased pest density pressure due to productive and commercial activities, human passage, variability, and climate change (Mendoza-Ramos *et al.*, 2021; López-Bautista *et al.*, 2020; Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017; Mora Aguilera *et al.*, 2014a, b, c), as well as the social demand for safe food production, lower carbon footprint and traceability of the environmental impact, will constitute the complex operational phytosanitary framework. Web-based ESS type 3, due to its *holistic-systemic* conception, support in decision algorithms, and predominantly *preventive* purpose, embraces the most suitable option to face these challenges. Type 1 and 2 epidemiological surveillance will continue in force but with an impact limited to the regulatory framework. Advances in digital technology have revolutionized the acquisition, management, and use of phytosanitary data, enabling the development and implementation of web-based ESS applied to regional management of phytosanitary risks (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Mora Aguilera *et al.*, 2014d). The optimization, harmonization, and quality indicators of all the processes intrinsic to a comprehensive ESS are equally feasible (Acevedo-Sánchez *et al.*, 2017; Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). However, the perspectives will be limited by classical scientific views, fragmented production models, and traditional phytosanitary policies. The adoption of new phytosanitary paradigms and scientific-technological innovation will determine the future of *holistic-systemic* ESS. For instance,

PERSPECTIVAS

La *vigilancia epidemiológica*, en su concepción *holística-sistémica*, representa el futuro de la fitosanidad aplicada a la mitigación de riesgos. La velocidad de procesos epidémicos a nivel global ha escalado en tiempo y espacio. Los manejos parcelarios clásicos son cada vez menos eficientes y rentables en términos ambientales y de activos productivos obligando a la búsqueda de estrategias regionales. La movilidad e incremento de carga de plagas por la actividad productiva y comercial, trasiego humano, variabilidad y cambio climático (Mendoza-Ramos *et al.*, 2021; López-Bautista *et al.*, 2020; Carbajal-Yepez *et al.*, 2019; Parnell *et al.*, 2017; Mora-Aguilera *et al.*, 2014a, b, c); así como la exigencia social por una producción inocua de alimentos, menor huella de carbono y trazabilidad del impacto ambiental constituirán el complejo marco operativo de la fitosanidad. Los SVE tipo 3 base web, por su concepción *holística-sistémica*, soporte en algoritmos de decisión y propósito predominantemente preventivo, constituye la opción más idónea para enfrentar estos retos. La vigilancia epidemiológica tipo 1 y 2 seguirá vigente, pero con impacto acotado al marco normativo. Claramente, los avances de la tecnología digital han revolucionado la adquisición, manejo y uso de datos fitosanitarios posibilitando el desarrollo e implementación de SVE web aplicados al manejo regional de riesgos fitosanitarios (Coria-Contreras *et al.*, 2019; Mora aguilera *et al.*, 2014d). La optimización, armonización e indicadores de calidad de todos los procesos intrínsecos a un SVE integral son igualmente factibles (Acevedo-Sánchez *et al.*, 2017; Guzmán-Hernández *et al.*, 2017). Las perspectivas estarán, sin embargo, acotadas por visiones científicas clásicas, modelos productivos fragmentados y políticas fitosanitarias tradiciones. La adopción de nuevos paradigmas fitosanitarios y la innovación

classical epidemiology focused on studies at limited farm production units; the *epidemiological triangle* or *tetrahedron* adoption; and the conception of damage dependent solely on infectious processes constitute restrictive premises that are not compatible with an ESS focused on crop health in the broad productive sense.

CONCLUSIONS

In 1975, Krause and collaborators predicted that: *'The future in plant disease prediction will perhaps be centralized national, regional, or state facilities, equipped with data processing machinery linked to remote data acquisition units. These facilities could monitor environmental parameters and process data for diseases, pests, and growing conditions on many crops. Such a network could make disease predictions, issue warnings, and perhaps make definitive disease control recommendations as they are necessary'*. Spurred on by the digital revolution, this foresight has been clearly demonstrated. Successful web-based ESS type 3 cases operated by NPPOs, RPPOs, and producer associations have shown the assertiveness of space-scaled digital phytosanitary management. However, strong scientific-technological innovation challenges still prevail with pertinent normative and operational frameworks. Due to its *holistic-systemic* and *preventive* nature, a web-based ESS type 3 emphasizes the crop's health under a sustainable and resilient approach. The *protection* principle as understood with the classical view of intervening an epidemic to decrease its intensity, i.e., its epidemic rate, is subordinated to the *preventive* principle optimized through economic-biological decision thresholds. Digital technology is a vital component of innovation, but it does not define the success

científica-tecnológica determinarán el futuro de la VE. Por ejemplo, la epidemiología clásica enfocada a estudios en unidades productivas parcelarias; adopción del *triángulo o tetraedro epidemiológico*; y la concepción del daño dependiente únicamente de procesos infecciosos, constituyen premisas restrictivas. No compatibles con SVE enfocados a la salud de cultivos en el amplio sentido productivo.

CONCLUSIONES

En 1975, Krause y colaboradores predijeron que: *'The future in plant disease prediction will perhaps be centralized national, regional, or state facilities, equipped with data processing machinery linked to remote data acquisition units. These facilities could monitor environmental parameters and process data for diseases, pests, and growing conditions on many crops. Such a network could make disease predictions, issue warnings, and perhaps make definitive disease control recommendations as they are necessary'*. Incentivada por la revolución digital, esta previsión ha quedado claramente demostrada. Casos exitosos de SVE tipo 3 base web operados por ONPFs, ORPFs y asociaciones de productores han mostrado la asertividad de un manejo fitosanitario digital escalado en espacio. Sin embargo, aún prevalecen fuertes retos de innovación científica-tecnológica con marcos normativos y operativos pertinentes. Por su naturaleza sistémica y preventiva, un SVE tipo 3 enfatiza la salud del cultivo bajo un enfoque sustentable y resiliente. El principio de *protección*, entendido con el enfoque clásico de intervenir una epidemia para disminuir su intensidad, i.e., su tasa epidémica, queda subordinado al principio *preventivo* optimizado mediante umbrales económico-biológicos de decisión. La tecnología digital es un fuerte componente de innovación, pero no define el éxito de

of an Epidemiological Surveillance Program. The *holistic-systemic* epidemiological conception of the phytosanitary problem focused on the crop's health, understood and validated in the field by interdisciplinary teams, determines the applicability and relevance of a comprehensive ESS.

ACKNOWLEDGMENTS

To the Directorate General of Plant Health of SENASICA for the financial support to develop and provide the technical-scientific support to PVEF-Cafeto. To the technical staff of the State Plant Health Committees of Chiapas, Puebla, Veracruz, SLP, Guerrero, Colima, Nayarit, Oaxaca, Hidalgo, Querétaro, Jalisco and Edo. de Mexico, for their professionalism and commitment in the operation of the PVEF-Cafeto. And to Miranda Mora for her assistance on the English translation. To coffee producers who, without any restriction, allowed access to their properties. To COLPOS to support the execution of PVEF-Cafeto project.

~~~~~ End of the English version ~~~~~

un Programa de Vigilancia Epidemiológico. La concepción epidemiológica *holística-sistémica* del problema fitosanitario enfocado a la salud del cultivo, comprendido y validado en el campo por equipos interdisciplinarios, determina la aplicabilidad y pertinencia de un SVE integral.

## AGRADECIMIENTOS

A la Dirección General de Sanidad Vegetal del SENASICA por el apoyo financiero para desarrollar y aportar el sustento técnico-científico de PVEF-Cafeto. Al personal técnico de Comités Estatales de Sanidad Vegetal de Chiapas, Puebla, Veracruz, SLP, Guerrero, Colima, Nayarit, Oaxaca, Hidalgo, Querétaro, Jalisco y Edo. de México, por su profesionalismo y

compromiso en la operación del PVEF-Cafeto. Por la asistencia en traducción al inglés a Miranda Mora. A productores de café que sin restricción permitieron el acceso a sus predios. A COLPOS por el soporte para la ejecución del proyecto PVEF-Cafeto.

## LITERATURA CITADA

- Aanensen DM, Huntley DM, Feil EJ, al-Own FA and Spratt BG. 2009. EpiCollect: Linking smartphones to web applications for epidemiology, ecology and community data collection. *Plos one* 4(9): e6968. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006968>
- Acevedo-Sánchez G, Santana-Peñaloza B, López-Bautista V, Martínez-Bustamante V, Coria-Contreras J, Mendoza-Ramos C, Jiménez-González L y Mora-Aguilera G. 2017. Criterios epidemiológicos para implementar una red de monitoreo de enfermedades causadas por *Fusarium* spp. en regiones agaveras de Jalisco. *Revista Mexicana de Fitopatología* 35S: 176-177. <http://rmf.smf.org.mx/suplemento/Suplemento352017.html>
- Acevedo-Sánchez G y Mora-Aguilera G. 2016. Desarrollo de REG-N Café v1.0 para determinar n-sitios de monitoreo-muestreo regional de roya del café en México usando criterios epidemiológicos ponderados. In. 49º Congresso Brasileiro de Fitopatologia. 29 agosto–01 septiembre. Alagoas, Maceio, Brasil.
- Acevedo-Sánchez G, Mora-Aguilera G, Coria-Contreras JJ, López-Muratalla Y, González-Gómez R y López-Buenfil A. 2015. Vulnerabilidad epidemiológica, productiva y socioeconómica en la cadena productiva del café en Chiapas, Veracruz y Puebla. *Revista Mexicana de Fitopatología* 33S: 120. <http://rmf.smf.org.mx/suplemento/Suplemento332015.html>
- Carvajal-Yepes M, Cardwell K, Nelson A, Garrett KA, Giovani B, Saunders DGO, Kamoun S, Legg JP, Verdier V, Lessele J, Neher RA, Day R, Pardey P, Gullino ML, Records AR, Bextine B, Leach JE, Staiger S and Tohme J. 2019. A global surveillance system for crop diseases. *Science* 364 (6447): 1237-1239. <https://doi.org/10.1126/science.aaw1572>
- Casacuberta D. 2013. Innovación, big data y epidemiología. *Revista Iberoamericana de Argumentación* 7: 1-12. <https://revistas.uam.es/ria/article/view/8176/8515>
- Chiavegatto ADP. 2015. Uso de big data em saúde no Brasil: perspectivas para um futuro próximo. *Epidemiologia e Serviços de Saúde* 24(2): 325-332. <https://doi.org/10.5123/S1679-49742015000200015>
- Coakley SM, McDaniel LR and Shaner G. 1985. Model for predicting severity of *Septoria tritici* blotch on winter wheat. *Phytopathology* 75: 1245-1251. [https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1985Articles/Phyto75n11\\_1245.PDF](https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1985Articles/Phyto75n11_1245.PDF)
- Coria-Contreras JJ, Mora-Aguilera G, Yañez-Morales MJ, Acevedo-Sánchez G, Santana-Peñaloza B, Mendoza-Ramos C, Jiménez-González L, Martínez-Bustamante VI, García-Martínez DC and Rubio-Cortés R. 2019. Applied regional epidemiology to inductive characterization and forecasting of blue agave gray spot (*Cercospora agavicola*) in Jalisco, Mexico. *Mexican Journal of Phytopathology* 37(1): 71-94. <http://doi.org/10.18781/R.MEX.FIT.1809-4>
- Coria-Contreras JJ, Acevedo-Sánchez G, Mendoza-Ramos C, Jiménez-González L y Mora-Aguilera G. 2015a. APLI-K v1.0: Sistema automatizado para la planeación de aplicación de productos químicos contra roya del café (*Hemileia vastatrix*). *Revista Mexicana de Fitopatología* 33S: 121. <https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen332015/Suplemento332015FULL.pdf>
- Coria-Contreras JJ, Acevedo-Sánchez G, Mora-Aguilera G y Martínez-Bolaños M. 2015b. Modelos de pronóstico de ocurrencia regional de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en el Soconusco Chiapas. *Revista Mexicana de Fitopatología* 33S: 121. <https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen332015/Suplemento332015FULL.pdf>
- De Wolf ED and Isard SA. 2007. Disease cycle approach to plant disease prediction. *Annual Review of Phytopathology* 45: 203-220. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.44.070505.143329>
- Drew DA, Nguyen LH, Steves CJ, Menni C, Freydin M, Varsavsky T, Sudre CH, Cardoso MJ, Ourselin S, Wolf J, Spector TD, Chan AT and Consortium C. 2020. Rapid implementation of mobile technology for real-time epidemiology of COVID-19. *Science* 368: 1362-1367. <https://doi.org/10.1126/science.abc0473>
- Firanj Sremac A, Lalić B, Marčić M and Dekić L. 2018. Toward a weather-based forecasting system for fire blight and downy mildew. *Atmosphere* 9(12): 1-17. <https://doi.org/10.3390/atmos9120484>
- Flores-Sánchez JL, Mora-Aguilera G, Loeza-Kukc E, López-Arroyo JJ, Gutiérrez-Espinosa MA, Velázquez-Monreal JJ, Domínguez-Monge S, Bassanezi RB, Acevedo-Sánchez G and Robles-García P. 2017. Diffusion model for describing the regional spread of Huanlongbing from first-reported outbreaks and basing an area wide disease management strategy. *Plant Disease* 101: 1119-112. <https://doi.org/10.1094/PDIS-04-16-0418-RE>
- Golhani K, Balasundram SK, Vadamalai G and Pradhan B. 2018. A review of neural networks in plant disease detection using hyperspectral data. *Information Processing in Agriculture* 5(3): 354-37. <https://doi.org/10.1016/j.inpa.2018.05.002>
- Guzmán-Hernández E, Flores-Colorado O, Acevedo-Sánchez G, Mora-Aguilera G, López-Javier MA y González-Gómez R. 2017. Apps como herramientas de soporte epidemiológico aplicado a sistemas regionales de vigilancia epidemiológica. *Revista Mexicana de Fitopatología* 35S: 184. [https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen352017/VOLUMEN\\_35\\_SUPLEMENTO\\_2017.pdf](https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen352017/VOLUMEN_35_SUPLEMENTO_2017.pdf)
- Huber L and Gillespie TJ. 1992. Modeling leaf wetness in relation to plant disease epidemiology. *Annual Review of Phytopathology* 30: 553-577. <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev.py.30.090192.003005>
- Kang WS, Hong SS, Han YK, Kim KR, Kim SG and Park EW. 2010. A web-based information system for plant disease forecast based on weather data at high spatial resolution. *The Plant Pathology Journal* 26(1): 37-48. <https://doi.org/10.5423/PPJ.2010.26.1.037>

- Kaundal R, Kapoor AS and Raghava GPS. 2006. Machine learning techniques in disease forecasting: a case study on rice blast prediction. BMC Bioinformatics 7:485. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-7-485>
- Kim HS, Do KS, Park JH, Kang WS, Lee YH and Park EW. 2020. Application of numerical weather prediction data to estimate infection risk of bacterial grain rot of rice in Korea. Plant Pathology Journal 36(1): 54-66. <https://doi.org/10.5423/PPJ.OA.11.2019.0281>
- Krause RA, Massie LB and Hyre RA. 1975. Blitecast: a computer forecast of potato late blight. Plant Disease Reporter 59(2): 95-98. <https://babel.hathitrust.org/cgi/pt?id=chi.23661187&view=1up&seq=112>
- Kuang W, Liu W, Ma Z and Wang H. 2012. Development of a web-based prediction system for wheat stripe rust. Pp. 324-335. In: 6th Computer and Computing Technologies in Agriculture (CCTA), Oct 2012, Zhangjiajie, China. <https://hal.inria.fr/hal-01348115/document>
- López-Bautista V, Mora-Aguilera G, Gutiérrez-Espinosa MA, Mendoza-Ramos C, Martínez-Bustamante VI, Coria-Contreras JJ, Acevedo-Sánchez G and Santana-Peñaloza B. 2020. Morphological and molecular characterization of *Fusarium* spp. associated to the regional occurrence of wilt and dry bud rot in *Agave tequilana*. Mexican Journal of Phytopathology 38(1): 79-106. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-33092020000100105&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-33092020000100105&script=sci_arttext&tlng=en)
- Ma J, Du K, Zheng F, Zhang L, Gong Z and Sun Z. 2018. A recognition method for cucumber diseases using leaf symptom images based on deep convolutional neural network. Computers and Electronics in Agriculture 154: 18-24. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.08.048>
- Madden L, Pennypacker SP and MacNab AA. 1978. FAST, a forecast system for *Alternaria solani* on tomato. Phytopathology 68: 1354-1358. [https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1978Articles/Phyto68n09\\_1354.pdf](https://www.apsnet.org/publications/phytopathology/backissues/Documents/1978Articles/Phyto68n09_1354.pdf)
- Magarey RD and Isard SA. 2017. A Troubleshooting guide for mechanistic plant pest forecast models. Journal of Integrated Pest Management 8(1): 1-7 <https://doi.org/10.1093/jipm/pmw015>
- Mendoza-Ramos C, Mora-Aguilera G, Coria-Contreras JJ, Santana-Peñaloza B, Acevedo-Sánchez G, Martínez-Bustamante V, Gutiérrez-Espinosa MA and Rubio-Cortés R. 2021. *Fusarium* spp. and inoculum load estimation associated to commercial *Agave tequilana* offsets at different regional epidemic inductivity levels. Mexican Journal of Phytopathology 39(1): 94-121. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmfi/v39n1/2007-8080-rmfi-39-01-94-en.pdf>
- Mendoza-Ramos C, Jiménez-González L, Coria-Contreras JJ, Acevedo-Sánchez G y Mora-Aguilera G. 2015a. Comportamiento aerobiológico de esporas de *Hemileia vastatrix* en la región nororiental de Puebla-Veracruz. Revista Mexicana de Fitopatología 33S: 238. <https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen332015/Suplemento332015FULL.pdf>
- Mendoza-Ramos C, Jiménez-González LR, Coria-Contreras JJ, Acevedo-Sánchez G, Santana-Peñaloza B, Martínez-Bolaños M y Mora-Aguilera G. 2015b. Efecto de ingrediente activo y dosis en la esporulación y expansión de lesión de *Hemileia vastatrix*. Revista Mexicana de Fitopatología 33S: 135. <https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen332015/Suplemento332015FULL.pdf>
- Mora-Aguilera G, Cortez-Madrigal H and Acevedo-Sánchez G. 2017. Epidemiology of entomopathogens: Basis for rational use of microbial control of insects. Southwestern Entomologist 42(1): 153-169. <https://doi.org/10.3958/059.042.0116>
- Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Guzmán-Hernández E, Coria-Contreras JJ, Mendoza-Ramos C, Jiménez-González L, Santana-Peñaloza B, González-Gómez R, López-Buenfil A, López-Javier M y Carranza P. 2016a. Criterios epidemiológicos de accionabilidad regional para control de la roya del café en México. Revista Mexicana de Fitopatología 34S: 23. [https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen342016/Suplemento\\_34\\_2016.pdf](https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen342016/Suplemento_34_2016.pdf)
- Mora-Aguilera G, Coria-Contreras JJ, Martínez-Bolaños M, Acevedo-Sánchez G y Santana-Peñaloza B. 2016b. Gradientes regionales de dispersión de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) en el Soconusco, Chiapas, México. In. 49º Congreso Brasileiro de Fitopatología. 29 agosto - 01 septiembre. Alagoas, Maceio, Brasil.
- Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Coria-Contreras J, González-Gómez R, López-Buenfil A y Javier-López MA. 2015a. Alertas tempranas regionales para manejo de focos de roya del café en México. Revista Mexicana de Fitopatología 33S: 64. <http://rmf.smf.org.mx/suplemento/Suplemento332015.html>
- Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Coria-Contreras JJ, López-Muratalla Y, López-Buenfil A y González-Gómez R. 2015b. C@FE-RISK v1.0: Simulador de riesgos regionales fitosanitarios, epidemiológicos y productivos en la cadena productiva del café en México. Revista Mexicana de Fitopatología 33S: 119. <http://rmf.smf.org.mx/suplemento/Suplemento332015.html>
- Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Calderón-Estrada G, Flores-Sánchez J, Domínguez-Monje S, Baker P and González-Gómez R. 2014a. Epidemiological considerations of climate change on tropical crops health. Mexican Journal of Phytopathology 32(2): 147-167. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-33092014000200147&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0185-33092014000200147&script=sci_arttext&tlng=en)
- Mora-Aguilera G, Flores-Sánchez F, Acevedo-Sánchez G, Domínguez-Monge S, Oropeza-Salín C, Flores-Olivas A, González-Gómez R and Robles-García P. 2014b. Epidemiological surveillance and current status of coconut lethal yellowing, potato purple top and citrus huanglongbing (HLB) in Mexico. Mexican Journal of Phytopathology 32(2): 120-131. [https://www.researchgate.net/publication/300533174\\_Epidemiological\\_Surveillance\\_and\\_Current\\_Status\\_of\\_Coconut\\_Lethal\\_Yellowing\\_Potato\\_Purple\\_Top\\_and\\_Citrus\\_Huanglongbing\\_HLB\\_in\\_Mexico](https://www.researchgate.net/publication/300533174_Epidemiological_Surveillance_and_Current_Status_of_Coconut_Lethal_Yellowing_Potato_Purple_Top_and_Citrus_Huanglongbing_HLB_in_Mexico)
- Mora-Aguilera G, Robles-García P, López-Arroyo JL, Flores-Sánchez J, Acevedo-Sánchez G, Domínguez-Monge D and González-Gómez R. 2014c. Current situation and perspectives in management of citrus HLB. Mexican Journal of Phytopathology 32(2): 108-119. [https://www.smf.org.mx/rmf/Vol3222014/AR/32-2\\_03.pdf](https://www.smf.org.mx/rmf/Vol3222014/AR/32-2_03.pdf)
- Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Domínguez-Monge D, Coria-Contreras JJ, Hernández-Hernández E, González-Gómez R, López-Buenfil A, Sánchez-Anguiano H, García-



- Feria J, Trujillo-Arriaga J, López-Pérez E, Méndez-Ramos A, Matuz-Conde J and Martínez-Bolaños M. 2014d. Epidemiological surveillance system for coffee rust disease (*Hemileia vastatrix*) in Mexico: A regional approach. In: The 25th International Conference on Coffee Science. 8-13 Septiembre. Armenia, Colombia. 1-6pp. [https://www.researchgate.net/publication/306347540\\_Epidemiological\\_Surveillance\\_System\\_for\\_Coffee\\_Rust\\_Disease\\_Hemileia\\_vastatrix\\_in\\_Mexico\\_A\\_Regional\\_Approach](https://www.researchgate.net/publication/306347540_Epidemiological_Surveillance_System_for_Coffee_Rust_Disease_Hemileia_vastatrix_in_Mexico_A_Regional_Approach)
- Mora-Aguilera G, Acevedo-Sánchez G, Flores-Sánchez J, Hernández R, González-Gómez R and Robles-García P. 2014e. Regional Epidemiology: A new frontier and challenge in plant pathology. In: Abstracts 47º Congresso Brasileiro de Fitopatologia “Desafios Futuros”. 17-22 agosto. Londrina, Paraná, Brasil. [https://www.researchgate.net/publication/301204091\\_Regional\\_Epidemiology\\_A\\_new\\_frontier\\_and\\_challenge\\_in\\_plant\\_pathology](https://www.researchgate.net/publication/301204091_Regional_Epidemiology_A_new_frontier_and_challenge_in_plant_pathology)
- Moschini RC, Carranza MR and Carmona MA. 2004. Meteorological-based predictions of wheat head blight epidemic in the southern Argentinean pampas region. *Cereal Research Communications* 32: 45–52. <https://doi.org/10.1007/BF03543279>
- Newlands NK. 2018. Model-based forecasting of agricultural crop disease risk at the regional scale, integrating airborne inoculum, environmental, and satellite-based monitoring data. *Frontiers in Environmental Science* 6: 1-16. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00063>
- Park EW, Seem RC, Gadoury DM and Pearson RC. 1997. DM-CAST: a prediction model for grape downy mildew development. *Viticulture and Enological Science* 52: 182–89 [https://www.researchgate.net/publication/258219975\\_DMCast\\_a\\_prediction\\_model\\_for\\_grape\\_downy\\_mildew\\_development](https://www.researchgate.net/publication/258219975_DMCast_a_prediction_model_for_grape_downy_mildew_development)
- Parnell S, van den Bosch F, Gottwald T and Gilligan CA. 2017. Surveillance to inform control of emerging plant diseases: An epidemiological perspective. *Annual Review of Phytopathology* 55: 591–610. <https://doi.org/10.1146/annurev-phyto-080516-035334>
- Pethybridge SJ and Nelson SC. 2018. Estimate a new ipad application for assessment of plant disease severity using photographic standard area diagrams. *Plant Disease* 102: 276-281. <https://doi.org/10.1094/PDIS-07-17-1094-SR>
- Pethybridge SJ and Nelson SC. 2015. Leaf Doctor: A new portable application for quantifying plant disease severity. *Plant Disease* 99: 1310-1316. <http://dx.doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0319-RE>
- Rosa M, Genesio R, Gozzini B, Maracchi G and Orlandini S. 1993. PLASMO: a computer program for grapevine downy mildew development forecasting. *Computers and Electronics in Agriculture* 9(3): 205-215. [https://doi.org/10.1016/0168-1699\(93\)90039-4](https://doi.org/10.1016/0168-1699(93)90039-4)
- Santana-Peñaloza B, Acevedo-Sánchez G, Coria-Contreras JJ, Mora-Aguilera G, González-Gómez R y López-Buenfil A. 2015. CALCULA-HF v1.0: Estimación de horas favorables de inductividad epidémica debido a la germinación de uredosporas de *Hemileia vastatrix*. *Revista Mexicana de Fitopatología* 33S: 119. <https://www.smf.org.mx/rmf/suplemento/docs/Volumen332015/Suplemento-332015FULL.pdf>
- SENASICA. 2016. Roya del café (*Hemileia vastatrix* Berkeley & Broome). Dirección General de Sanidad Vegetal. Programa de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria. México, D.F. Ficha Técnica No. 40. 23 p. <https://prod.senasica.gob.mx/SIRVEF/ContenidoPublico/Roya%20cafe/Fichas%20tecnicas/Ficha%20T%C3%A9cnica%20de%20Roya%20del%20cafe.pdf>
- SIAP (Servicio de Información Agrícola y Pesquera). 2018. Cierre de la producción agrícola por estados. <http://www.siap.gob.mx/cierre-de-la-produccion-agricola-por-cultivo/>
- Tsukahara RY, Marcelli H and Canteri MG. 2008. Relationship between climate and the progress of the asian soybean rust (*Phakopsora pachyrhizi*) in two micro-regions of Paraná State. *Ciências Agrárias* 29: 47-52. <https://www.redalyc.org/pdf/4457/445744087005.pdf>