

Metodología para incorporar la
categorización del Nivel de Madurez
Tecnológica (*Technology Readiness Levels*,
TRL) de NASA a nivel de proyecto en el
Marco de Resultados de FONTAGRO

Noviembre 2024

Elaborado por: Carlos Ludeña

Tabla de Contenido

Abreviaturas, siglas y acrónimos	ii
Glosario de Términos	i
1. Introducción	1
2. Evaluación del Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)	1
2.1. Conceptos	1
2.2. Disponibilidad de Recursos y Financiamiento por Etapa de TRL	3
2.3. Evaluación de TRLs en el sector agropecuario	5
Brasil	5
Estados Unidos	6
India	7
Indonesia.....	7
Unión Europea	8
3. Evaluación de proyectos de FONTAGRO con base a la metodología de TRL	9
4. Guía de autoevaluación de Nivel de TRL para proyectos de FONTAGRO	11
5. Conclusiones y Recomendaciones	16
4.1. Conclusiones	16
4.2. Recomendaciones	16
6. Bibliografía.....	18
7. Anexos.....	20
Anexo A. Guías Sectoriales de TRL de BIRAC (India)	20
Anexo B. Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) en Indonesia	27
Anexo C. Matriz de registro de TRL para proyectos de FONTAGRO.....	29

Índice de Tablas

Tabla 1. Definición de los Niveles de TRL/MRL usados por EMBRAPA.	5
Tabla 2. Nivel de preparación tecnológica de investigación (TRL) de cultivos de NIFA	6
Tabla 3. TRL inicial y final estimadas para 25 proyectos de FONTAGRO.....	9
Tabla 4. Guía de autoevaluación de nivel de TRL para proyectos de FONTAGRO.....	12

Índice de Figuras

Figura 1. Escala de Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)	2
Figura 2. Actores, disponibilidad de recursos, y financiamiento de acuerdo al nivel de TRL	3
Figura 3. Cambio en el nivel inicial y final de TRL en una muestra de proyectos de FONTAGRO	10

Abreviaturas, siglas y acrónimos

BIRAC	Consejo de Asistencia a la Investigación de la Industria Biotecnológica (Biotechnology Industry Research Assistance Council (India), BIRAC)
FONTAGRO	Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria
I+D+i	Investigación, desarrollo e innovación
I&D	Investigación y Desarrollo
INIAS	Institutos Nacionales de Investigación Agropecuaria
NIFA	Instituto Nacional de Alimentos y Agricultura (<i>National Institute of Food and Agriculture</i>)
PMP	Plan de Mediano Plazo
STA	Secretaría Técnica y Administrativa
TRL	Nivel de Madurez Tecnológica (<i>Technology Readiness Level</i>)

Abstract

The Technology Readiness Level (TRL) scale was originally defined by NASA in the 1990s to measure or indicate the maturity of a given technology based on its level of development, from a sketch on paper to its market entry. The TRL is one of the widely recognized frameworks to assess the technological progress of research and development (R&D) projects, including for the agricultural sector. The paper presents the application of the TRL for the agricultural sector in several countries, including Brazil (Embrapa), the United States (NIFA), India (BIRAC), Indonesia, and the European Union. The results at the FONTAGRO project level are also presented for a sample of 76 projects developed by the FONTAGRO Technical Secretariat, where it is shown that the majority of these have an initial mode at TRL 3 and a final mode at TRL 6. Finally, the document proposes a methodology for self-assessment of initial TRL, so that this indicator is included as part of the registry of new FONTAGRO projects.

Resumen

La escala de Nivel de Madurez Tecnológica (*Technology Readiness Level*, TRL) fue definida originalmente por la NASA en la década de 1990 como un medio para medir o indicar la madurez de una tecnología determinada según su nivel de desarrollo, desde un boceto en papel hasta su entrada en el mercado. El TRL es uno de los marcos ampliamente reconocidos para evaluar el avance tecnológico de los proyectos de investigación y desarrollo (I+D), incluyendo para el sector agropecuario. El documento presenta la aplicación de la TRL para el sector agropecuario en diversos países, incluyendo Brasil (Embrapa), Estados Unidos (NIFA), India (BIRAC), Indonesia, y la Unión Europea. Se presenta también los resultados a nivel de proyectos de FONTAGRO para una muestra de 76 proyectos desarrollado por la Secretaría Técnica de FONTAGRO, en donde se muestra la mayoría de estos tiene una moda inicial en TRL 3 y una moda final en TRL 6. Por último, el documento propone una metodología de autoevaluación de TRL inicial, para que de esa manera se incluya este indicador como parte del registro de nuevos proyectos de FONTAGRO.

Glosario de Términos

Investigación científica	Investigación destinada a ampliar la base de conocimientos científicos teóricos y predicciones que tienen aplicabilidad universal
Investigación aplicada	Aplicación de conocimientos científicos para resolver problemas prácticos específicos o responder a ciertas preguntas
Investigación y desarrollo	Trabajo sistemático diseñado para producir nuevos productos, técnicas o procesos o mejorar productos, técnicas o procesos existentes
Prueba de concepto	Demostración analítica y experimental de conceptos de hardware/software.
Modelo	Forma funcional a escala reducida de un sistema, cercana o en la especificación operativa
Prototipo	Primera representación temprana del sistema que ofrece la funcionalidad y el rendimiento esperados de la implementación final
Entorno de laboratorio	Entorno de prueba completamente controlado donde se prueba un número limitado de funciones y variables. Las pruebas en un entorno de laboratorio tienen como único fin demostrar los principios subyacentes del rendimiento técnico (funciones), sin tener en cuenta el impacto del entorno
Entorno simulado	Entorno de trabajo relevante con condiciones realistas controladas, generalmente fuera del laboratorio. Si la tecnología se utilizará en diversos entornos (por ejemplo, la Amazonía y los Andes), la tecnología debe desarrollarse y probarse en un entorno simulado para todas las condiciones.
Entorno operativo	Entorno del “mundo real” con condiciones asociadas con el uso típico del producto o proceso. Si la tecnología se utilizará en diversos entornos (por ejemplo, la Amazonía y los Andes), la tecnología debe desarrollarse y probarse en cada entorno operativo.

Fuente: Ajustado de U.S. National Science Foundation (2018), U.S. Department of Energy (2015), U.S. Department of Transportation (2017), SBIR (2014).

1. Introducción

FONTAGRO (Fondo Regional de Tecnología Agropecuaria) es una alianza de 15 países cuyo objetivo es establecer un mecanismo sostenible para el desarrollo de tecnología e innovación en el sector agroalimentario de América Latina y el Caribe, e instituir un foro para la discusión de temas prioritarios de innovación tecnológica. El Plan de Mediano Plazo (PMP) 2020-2025 de FONTAGRO estableció la filosofía corporativa, destacando como su visión la de “transformar los sistemas agroalimentarios a través del conocimiento para que sean más inclusivos y sostenibles con el medio ambiente y la sociedad”, y como su misión la de “liderar la articulación, la cooperación y el dialogo regional a través del cofinanciamiento sostenible de iniciativas de bienes públicos que aporten al conocimiento e innovación de los sistemas agroalimentarios y a la mejora de la calidad de vida de la población”.

De cara a la renovación del PMP 2020-2025, la construcción de una nueva agenda estratégica para los INIAs y la renovación de acuerdos con los patrocinadores de FONTAGRO, BID e IICA, se busca integrar en el marco de resultados de los proyectos de FONTAGRO con base a la categorización de “Technology Readiness Levels” (TRL) de NASA, destacando recomendaciones de como FONTAGRO puede apoyar a la generación de tecnologías y procesos de innovación.

El **objetivo** de este documento es desarrollar una metodología simplificada para incorporar la categorización del Nivel de Madurez Tecnológica (*Technology Readiness Levels*, TRL) de NASA a nivel de proyecto en el Marco de Resultados de FONTAGRO e integrar de manera más clara en los objetivos de FONTAGRO el apoyar a la generación de tecnologías y procesos de innovación.

2. Evaluación del Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)

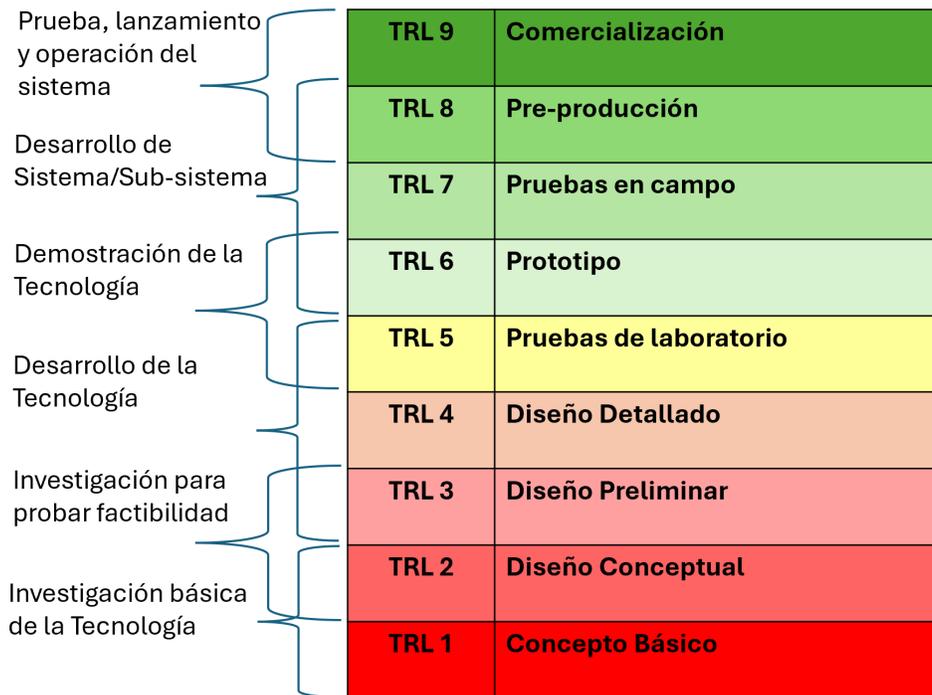
2.1. Conceptos

La escala de Nivel de Madurez Tecnológica (*Technology Readiness Level*, TRL) fue definida originalmente por la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA)¹ en la década de 1990 como un medio para medir o indicar la madurez de una tecnología determinada según su nivel de desarrollo, desde un boceto en papel hasta su entrada en el mercado. El TRL es uno de los marcos ampliamente reconocidos para evaluar el avance tecnológico de los proyectos de investigación y desarrollo (I+D).² La escala TRL permite evaluar la madurez de una tecnología específica desde la etapa conceptual hasta su implementación completa. La escala TRL tiene nueve niveles de preparación tecnológica. El TRL 1 es el más bajo, lo que indica la etapa más temprana de desarrollo de una nueva tecnología, y el TRL 9 es el más alto, lo que indica que la tecnología está completamente implementada y tiene un impacto activo en la economía. La Figura 1 ilustra la escala de TRL en sus distintas etapas.

¹ Ver Manning (2023), Banke (2010) y NASA (s.f.).

² Existe también el concepto de Nivel de Madurez de Manufactura (Manufacturing Readiness Level, MRL). En este caso, los TRL se refieren a los niveles de madurez de un producto (activo tangible), mientras que los MRL se adoptan para designar los niveles de madurez de un proceso de producción (activo intangible).

Figura 1. Escala de Nivel de Madurez Tecnológica (TRL)



El detalle de cada nivel se describe a continuación:

TRL 1	Principios básicos observados e informados. Este es el nivel más bajo de preparación tecnológica. La investigación científica comienza a traducirse en investigación y desarrollo aplicados.
TRL 2	Concepto tecnológico y/o aplicación formulada. Los innovadores describen la aplicación de la ciencia para lograr un producto determinado.
TRL 3	Prueba de concepto crítica analítica y experimental de función o característica. Esta etapa prueba las predicciones teóricas utilizando métodos experimentales.
TRL 4	Validación de componentes y/o maqueta en ambiente de laboratorio. Se demuestra que la tecnología funciona en laboratorio.
TRL 5	Validación de componentes y/o maqueta en un ambiente relevante. La fidelidad del componente aumenta para incluir pruebas en un entorno operativo simulado.
TRL 6	Demostración de modelo de sistema/subsistema o prototipo en un ambiente relevante. El prototipo está cerca o al nivel del sistema operativo planeado. Representa un paso importante en la demostración de la preparación de la tecnología.
TRL 7	Demostración de prototipo de sistema en un ambiente operativo. El prototipo está cerca o al nivel operativo planeado y se prueba en el entorno operativo.
TRL 8	Sistema real completado y calificado a través de pruebas y demostraciones. Se ha demostrado que la tecnología funciona en su forma final y bajo condiciones esperadas.
TRL 9	Sistema real probado a través de operaciones de misión exitosas. La tecnología no solo se ha demostrado que funciona, sino que realmente está en uso en su forma final.

Cuando una tecnología se encuentra en TRL 1, la investigación científica acaba de comenzar y los primeros resultados se utilizan para traducirlos en investigación y desarrollo futuros. En TRL 2 se han estudiado los principios básicos y se diseñan los primeros experimentos/pruebas en función de los hallazgos iniciales. La tecnología TRL 2 aún es muy especulativa. Cuando los resultados de los experimentos/pruebas respaldan la idea inicial, se considera que la tecnología se encuentra en TRL 3. Por lo general, en este nivel se requieren estudios tanto analíticos como de laboratorio para ver si una tecnología está lista para pasar a las fases de desarrollo. En TRL 3, se construye un modelo de prueba de concepto. Al llegar a este punto, se puede concluir que la nueva tecnología es factible desde un punto de vista científico.

En el nivel TRL 4, la validación de la tecnología se ha realizado a nivel de laboratorio, probando cada componente, por lo que en este punto se dispone de un prototipo de laboratorio. El nivel TRL 5 es una continuación del nivel TRL 4, pero el entorno de prueba se acerca lo más posible a uno realista, aunque todavía el entorno está bajo un modo de control. Al llegar a este punto, se puede concluir que la nueva tecnología es factible desde un punto de vista tecnológico.

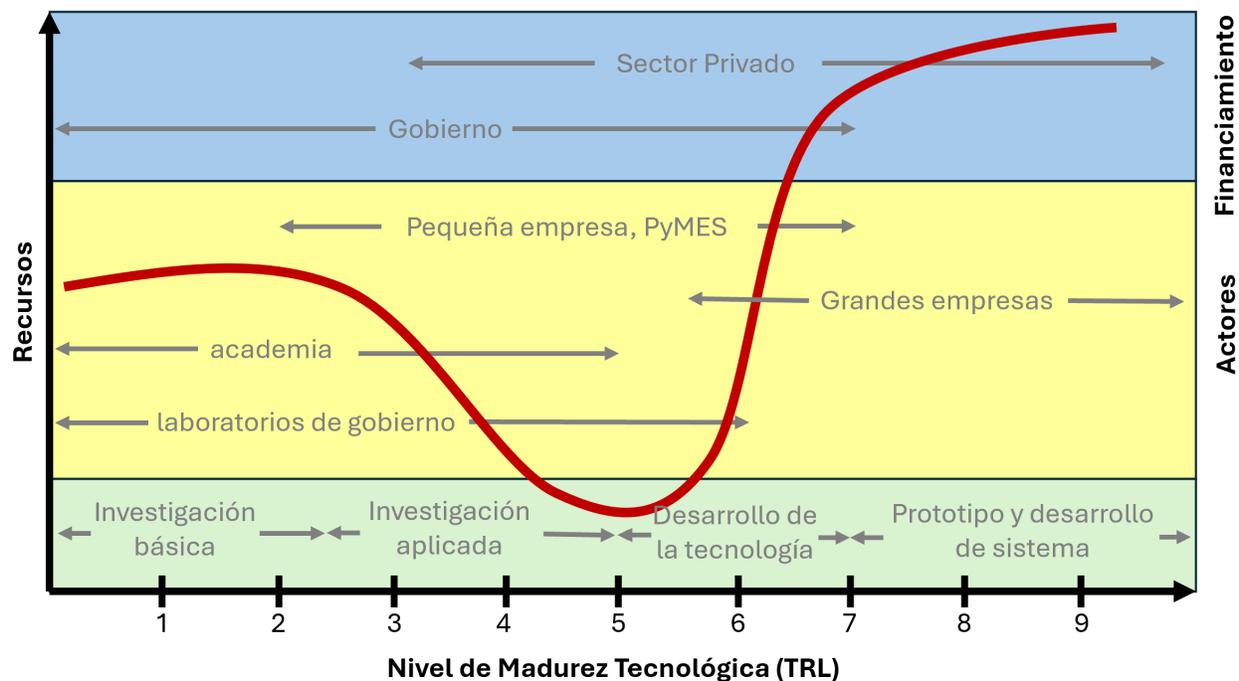
En el nivel TRL 6, el prototipo tiene que demostrarse en un entorno real, de modo que se confirme que la ingeniería es factible. En el nivel TRL 7, la tecnología requiere que el modelo de trabajo o el prototipo desarrollado se demuestre en un entorno operativo, normalmente en condiciones y tiempos industriales. Al llegar a este punto, se puede concluir que la nueva tecnología es fiable desde el punto de vista tecnológico.

En el nivel TRL 8, la tecnología está lista para su implementación en una tecnología o sistema tecnológico ya existente. Una vez que el sistema tecnológico se ha probado durante las operaciones, se puede llamar nivel TRL 9 y considerarse una tecnología comercial.

2.2. Disponibilidad de Recursos y Financiamiento por Etapa de TRL

La Figura 2 muestra a los distintos actores por etapa de TRL en cuanto a participación y financiamiento. En las primeras etapas de desarrollo (investigación básica e investigación aplicada) (TRL 1-5) existe un rol más activo de gobierno y academia, el cual es reemplazado por el sector privado (pequeñas, medianas y grandes empresas) a medida que se alcanzan etapas más altas de TRL (TRL 3-9).

Figura 2. Actores, disponibilidad de recursos, y financiamiento de acuerdo al nivel de TRL



Fuente: Hensen et al (2015).

A nivel de financiamiento, el gobierno tiene un rol más importante en las primeras etapas de TRL (TRL 1-7), el cual a su vez es reemplazado paulatinamente por el sector privado (TRL 3-9). Esta transición entre gobierno y sector privado para alcanzar los niveles superiores de TRL de transferencia de tecnología y comercialización de productos y servicios comercializables no suele ser sencilla. La línea roja muestra una discontinuidad en los procesos de innovación entre TRL 3 y TRL 6, la cual es conocida como el Valle de la Muerte. Esta es una metáfora de la falta de recursos y experiencia que impide que las nuevas ideas pasen del laboratorio al mercado. Esta brecha también obstaculiza la innovación y la adopción de nuevas tecnologías. Se pueden identificar varias razones que generan esta situación:

- La investigación básica se realiza principalmente con financiamiento público, mientras que los inversores privados están interesados principalmente en trabajar hacia la viabilidad comercial. Esto deja un vacío en el medio.
- La inversión requerida en esta área es generalmente alta, pero la certeza de éxito relativamente baja. Solo unos pocos conceptos tecnológicos se convertirán en productos comerciales exitosos.
- Hay una falta de herramientas que puedan proporcionar información en una fase temprana de I+D (TRL 1-5). Esto da como resultado un desajuste entre la necesidad y la disponibilidad de información y complica la toma de decisiones.
- Hay procesos que requieren un enfoque interdisciplinario. Es posible que no siempre esté disponible la combinación adecuada de habilidades y experiencia.

El desarrollo de métodos y herramientas que puedan superar esta situación se considera un paso urgente y, por lo tanto, puede ser un posible enfoque de financiamiento de fondos especializados como FONTAGRO.

2.3. Evaluación de TRLs en el sector agropecuario

Normalmente, las nuevas tecnologías pasan por las distintas etapas de la escala TRL en su ciclo de vida. Durante las fases de investigación y desarrollo, es posible tener iteraciones entre los diferentes niveles TRL. En este sentido, la escala TRL también ayuda a evaluar el progreso de un proyecto. De acuerdo a la STA FONTAGRO (2024), evaluar y asignar un TRL no es sencillo e implica un cierto grado de subjetividad. La interpretación de lo que constituye un "ambiente relevante" o "ambiente operativo" puede variar significativamente según el dominio tecnológico, la aplicación específica e incluso los intereses de los potenciales usuarios.

La transición de un nivel a otro no siempre es clara y a menudo requiere evaluaciones integradas de equipos multidisciplinarios. Además, el desarrollo tecnológico no es lineal. Los proyectos pueden enfrentar contratiempos que podrían requerir visitar etapas anteriores o avanzar más rápidamente en ciertas áreas mientras se retrasan en otras. Esta progresión dinámica hace que la asignación precisa de un TRL sea tanto matizada como ocasionalmente ambigua. Para reflejar esta complejidad, las evaluaciones de TRL a menudo se dan como rangos (por ejemplo, TRL 4-5) para reconocer la incertidumbre inherente y la fluidez en los procesos de maduración tecnológica.

En ese sentido, varios países han desarrollado guías a nivel sectorial para el sector agropecuario. A continuación, se muestran algunos ejemplos de Brasil (Embrapa), Estados Unidos (NIFA), India (BIRAC), Indonesia, la Unión Europea y de FONTAGRO.

Brasil

En 2018, Embrapa incorporó la escala TRL/MRL a ser aplicada a los activos tecnológicos generados por la I+D+i, con una subdivisión en 9 niveles de madurez, conforme ilustra la Tabla 1 abajo:

Tabla 1. Definición de los Niveles de TRL/MRL usados por EMBRAPA.

Nivel	Definición	TRL - Tecnología	MRL - Proceso
1	Ideación	Principios básicos observados e informados	Implicancias básicas de fabricación identificadas
2	Concepto	Concepto de tecnología y/o aplicación formulada	Conceptos de fabricación identificados
3	Prueba de Concepto	Función crítica analítica y experimental y/o prueba de concepto característica.	Prueba de concepto de fabricación desarrollada.
4	Optimización	Validación de componentes y/o placa de pruebas en un entorno de laboratorio.	Capacidad para producir la tecnología en un entorno de laboratorio.
5	Prototipo	Validación de componentes y/o placa de pruebas en un entorno relevante.	Capacidad para producir componentes prototipo en un entorno relevante de producción.
6	Escalamiento	Modelo de sistema/subsistema o demostración de prototipo en un entorno operativo.	Capacidad para producir un sistema o subsistema prototipo en un entorno relevante de producción.
7	Demostración en un entorno operativo	Demostración del prototipo del sistema en un entorno operativo.	Capacidad para producir sistemas, subsistemas o componentes en un entorno representativo de producción.

Nivel	Definición	TRL - Tecnología	MRL - Proceso
8	Producción	Sistema real completado y calificado mediante prueba y demostración.	Capacidad de línea piloto demostrada. Listo para comenzar la producción a baja velocidad.
9	Producción continua	Sistema operado en toda la gama de condiciones operativas.	Producción a baja velocidad demostrada; capacidad en funcionamiento para comenzar la producción a alta velocidad

Fuente: EMBRAPA (2024). <https://www.embrapa.br/en/escala-dos-niveis-de-maturidade-tecnologica-trl-mrl>

Estados Unidos

En Estados Unidos, el Instituto Nacional de Alimentos y Agricultura (NIFA por sus siglas en inglés) introdujo el nivel de preparación tecnológica de investigación de cultivos (TRL) para su uso en el Programa de cultivos complementarios y alternativos (SACP), el Programa de investigación de alfalfa y forrajes (AFRP) y el Programa de investigación de mejoramiento de papas para evaluar el progreso en el desarrollo de una nueva tecnología y comunicar el nivel de madurez de una tecnología desde su concepto inicial hasta su implementación a gran escala y uso comercial por parte de la industria. Las nueve escalas del TRL de investigación de cultivos avanzan a través de cuatro actividades generales hacia la madurez: i) evaluación preliminar de la solución tecnológica, ii) pruebas experimentales, iii) evaluación precomercial, y iv) implementación comercial.

Cada propuesta presentada a estos programas NIFA requiere una evaluación del TRL de investigación de cultivos del estado actual de preparación de cada tecnología que se apoya a través de la financiación del proyecto. Para determinar el progreso a lo largo de la implementación del proyecto, se requiere una evaluación al comienzo del proyecto y su avance estimado esperado para el final del proyecto. El avance se describe como el progreso de un nivel de preparación de tecnología a otro. Los nueve niveles de preparación de tecnología son definidos por el director del proyecto como logros específicos basados en las descripciones generalizadas que se muestran en la Tabla 2, y que sirve como una hoja de trabajo del TRL de investigación de cultivos de NIFA.

Tabla 2. Nivel de preparación tecnológica de investigación (TRL) de cultivos de NIFA

Actividad	Nivel TRL	Descripción	Descripción general
Evaluación preliminar de la solución tecnológica	1	Desafío u oportunidad identificado	Enuncie el desafío que enfrenta la industria u otros usuarios y la necesidad de un nuevo tipo de innovación, como una variedad, una práctica u otra solución tecnológica.
	2	Formulación de una solución o enfoque	Estime el valor de la solución innovadora en comparación con la variedad, la práctica u otras tecnologías existentes, y dónde encaja la solución en la cadena de suministro general.
Pruebas Experimentales	3	Implementación de experimentos de prueba de concepto	Examine el germoplasma, identifique rasgos o pruebe otro tipo de innovación tecnológica de interés para demostrar su valor agregado potencial.
	4	Pruebas de campo o experimentos de validación	Realice ensayos de campo u otros experimentos de desempeño tecnológico para determinar el rendimiento potencial, la calidad del producto, la eficiencia operativa, los costos y los retornos o las mejoras en la calidad de los recursos que resultarían de la innovación.

Actividad	Nivel TRL	Descripción	Descripción general
Evaluación pre-comercial	5	Se validó la aceptación comercial	Realice ensayos de producción a escala de campo u otras evaluaciones tecnológicas in situ para determinar los costos reales de producción, el uso de recursos, el potencial de mercado u otras limitaciones técnicas, incluida la aceptación en el mercado.
	6	Se inició la producción a gran escala	Prozuya materiales de plantación certificados u otros tipos de tecnologías y asegúrese de que estén disponibles para uso comercial y se puedan obtener para la producción a gran escala.
Lanzamiento comercial	7	Se dispuso de disponibilidad en el mercado	La producción a escala comercial por parte de productores o fabricantes ocurre con la entrega de productos a productores, manipuladores, procesadores, distribuidores u otros participantes de la cadena de suministro a los puntos de venta del mercado y para satisfacer la demanda de los usuarios.
	8	Se estableció el uso comercial	Monitoreo e investigación continuos a nivel de sistema para mejorar el sistema de producción o la aplicación de tecnología mientras se gestionan múltiples cuestiones relacionadas con los recursos naturales y humanos en toda la cadena de suministro.
	9	Se logró una capacidad de producción sostenida	Se encuentra disponible una gama completa de servicios del sector público y privado para respaldar la producción, el manejo, la distribución y los mercados a nivel de sistema en toda la cadena de suministro.

India

En el caso de India, el Consejo de Asistencia a la Investigación de la Industria Biotecnológica (BIRAC por sus siglas en inglés) desarrolló guías de TRL para 10 sectores (ver Anexo A).³ De estos, Para el caso del sector agropecuario, desarrolló guías para Agricultura (Tabla A1), biotecnología industrial (incluyendo agricultura secundaria) (Tabla A2), Inteligencia artificial, análisis de big data, internet de las cosas (*Internet of Things*, IoT), desarrollo de software y bioinformática (Tabla A3), Veterinaria (Tabla A4), y Acuicultura y Pesca (Tabla A5). Estas guías sectoriales ofrecen el mayor detalle relativo a otros países, y pueden ser usadas como referencia sectorial en otros países.

Indonesia

En el caso de Indonesia, bajo el programa Newton Institutional Links, se ofrecen subvenciones para el desarrollo de colaboraciones en materia de investigación e innovación entre el Reino Unido e Indonesia. La investigación facilitada por estas subvenciones aborda las necesidades y los desafíos del desarrollo local, como las condiciones climáticas extremas, el acceso a una atención sanitaria asequible y la seguridad alimentaria y energética. Este programa tiene la participación de la Agencia Nacional de Innovación en Investigación bajo el Ministerio de Tecnología de Investigación de Indonesia, y el British Council, con el financiamiento de Newton Fund (Reino Unido) y de Ristekdikti (Indonesia). Bajo estas convocatorias, se definieron guías sectoriales. El Anexo B incluye la guía para Agricultura, Pesca y Ganadería (Tabla B1).

³ BIRAC (2024).

Unión Europea

La escala TRL se introdujo en los proyectos financiados por la Unión Europea en 2012 y actualmente es el punto de referencia para determinar el desarrollo o madurez de una investigación y su preparación para su aceptación en el mercado y posibles inversiones.⁴ En 2014, la escala TRL se incorporó a los proyectos financiados por la Unión Europea (UE) en el marco del programa Horizonte 2020.⁵ El programa Horizonte Europa adoptó entonces la escala TRL como indicador para mejorar el posicionamiento de los proyectos que se postulaban en el programa. Esta escala unificada permite a los solicitantes y evaluadores cumplir con las expectativas de la Comisión Europea. Esto convierte a la escala TRL en una herramienta clave en las condiciones marco de participación de Horizonte Europa 2021-2027. Para ser elegibles para financiamiento, los proyectos enfocados hacia acciones de investigación e innovación deben estar enfocados hacia proyectos de TRL 4-6, mientras que proyectos de innovación se enfocan en TRL 6-8. En este caso, un TRL más alto en una convocatoria indica que se está buscando una solución más aplicativa dentro del proyecto, mientras que un TRL más bajo indica que se espera un proyecto de investigación más fundamental. El TRL también se utiliza para indicar el punto de entrada, es decir, el nivel de madurez de una tecnología, producto o proceso determinado al inicio del proyecto. En este caso, el TRL respectivo sirve como límite inferior. El programa Horizon también desarrolló guías simplificadas de autoevaluación de TRL para sus convocatorias de proyectos.⁶ Existen guías sectoriales como las Guías de Energía Renovable, las cuales incluyen Anexos relacionados a bioenergía (ruta biológica y ruta termodinámica).

⁴ Euraxess (2024).

⁵ Strazza et al. (2017a and 2017b).

⁶ Horizon Europe (2022).

3. Evaluación de proyectos de FONTAGRO con base a la metodología de TRL

En el caso de FONTAGRO, la Secretaría Técnica de FONTAGRO (2024) desarrolló un análisis de TRL para 71 proyectos financiados por FONTAGRO ejecutados en su totalidad. La lista de proyectos, junto con su TRL inicial y final se muestra en la Tabla 3 y Figura 3. Los resultados de este análisis muestran que esta muestra de 71 proyectos tiene una moda inicial en TRL 3 y una moda final en TRL 6. Esto indica que la mayoría de los proyectos parten de un TRL 3, donde se realiza la prueba de concepto crítica analítica y experimental de la función o característica. En esta etapa, se prueban las predicciones teóricas utilizando métodos experimentales. Al finalizar, la mayoría de los proyectos alcanzan un TRL 6, que corresponde a la demostración de un modelo o prototipo del sistema o subsistema en un entorno relevante, acercándose así a su aplicación real. El salto tecnológico promedio es de 2.7 niveles, lo que sugiere un progreso significativo en el desarrollo tecnológico de la mayoría de los proyectos.

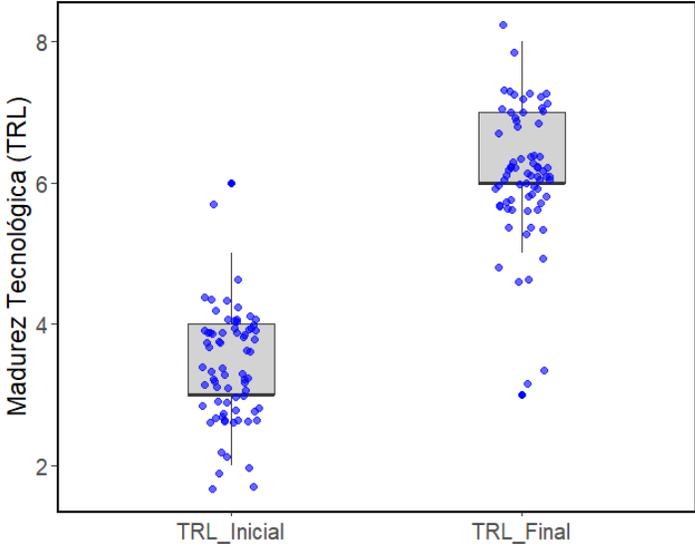
Tabla 3. TRL inicial y final estimadas para 25 proyectos de FONTAGRO

Título del proyecto	Código	Nivel de TRL	
		Inicial	Final
Agricultura familiar, Innovación y Mercados	ATN/RF-16108-RG	3-4	6-7
Innovación Tecnológica en Cacao Andino	ATN/RF-16109-RG(RG-T2946)	3-4	5-6
Desarrollo de microeconomías - aceites esenciales	ATN/RF-16110-RG	3-4	6-7
Productividad y Competitividad Frutícola Andina	ATN/RF-16111-RG	4-5	7-8
Red Gran Chaco Americano	ATN/RF-16112-RG(RG-T3010)	3-4	5-6
Innovaciones, horticultura, ambientes protegidos	ATN/RF-16343-RG(RG-T3116)	6-7	7-8
Intensificación agricultura familiar en Perú y Bolivia	ATN/RF-16677-RG(RG-T3178)	4-5	6
Alerta temprana para tizón tardío de la papa	ATN/RF-16678-RG(RG-T3180)	4	6
Adaptación al cambio climático de la ganadería familiar	ATN/RF-16680-RG	3-4	6-7
Manejo más sostenible en el cultivo del arroz	ATN/RF-16681-RG	4-5	6-7
Intensificación de sistemas ganaderos con leguminosas	ATN/RF-16926-RG	3-4	6
Control Sustentable del vector Huanglongbing (HLB)	ATN/RF-17232-RG(RG-T3373)	3-4	6-7
Escalando mejora continua en banano orgánico	ATN/RF-17233-RG(RG-T3374)	3	3
Plataforma de cacao para América Latina y el Caribe	ATN/RF-17235-RG(RG-T3372)	3-4	6-7
Sistema de Asesoramiento al Regante y TICs.	ATN/RF-17245-RG-Agtech19037	3	6
Digitalización de la agricultura de pequeña escala	ATN/RF-17245-RG-Agtech19043	3	7
AHoRa: Aplicativo para productores de musáceas	ATN/RF-17245-RG-Agtech19055	3-4	7-8
HUB SmartFruit-ALC	ATN/RF-17245-RG-Agtech19056	3-4	6-7
Gestión del agua.	ATN/RF-17950-RG(RG-T3589)	4-5	6-7
Innovación para la gestión del pasto	ATN/RF-18077-RG	3-4	7-8
Intensificación Sostenible Lechería	FTG/RF-15940-RG(RG-T2943)	2-3	5-6
Centros de oferta varietal de semillas tradicionales	FTG/RF-15460-RG	3-4	7-8
Innovaciones tecnológicas para el corredor seco	FTG/RF-15462-RG	3-4	6-7

Título del proyecto	Código	Nivel de TRL	
		Inicial	Final
Sistemas ganaderos familiares en Uruguay y Argentina	FTG/RF-15461-RG	4-5	7-8
Sistema de Alerta temprana a roya en café	FTG/FG-15072-RG	3-4	6-7
Cultivo biointensivo del corredor seco	FTG/RF-15459-RG	4	7

Fuente: STA FONTAGRO (2024).

Figura 3. Cambio en el nivel inicial y final de TRL en una muestra de 71 proyectos de FONTAGRO



Fuente: STA FONTAGRO (2024).

4. Guía de autoevaluación de Nivel de TRL para proyectos de FONTAGRO

Dado que el nivel de TRL del proyecto es auto declarado, es importante que el jefe de equipo de proyecto sepa cómo se aplica la definición y la escala del TRL dentro de su sector, especialmente porque la transición entre los niveles de TRL puede ser un poco difícil de alcanzar si solo se aplica la definición general definida anteriormente. Como el proceso de asignar TRL a un proyecto no es una tarea fácil, especialmente porque no es consistente en diferentes disciplinas, esta Guía ha desarrollado una matriz de TRL ampliada para ofrecer al usuario un apoyo para definir correctamente el TRL. Esta Guía de autoevaluación de TRL en la Tabla 4 debe ser usada en conjunto con las guías sectoriales que se encuentran en el Anexo A.

Esta herramienta de evaluación de TRL de la Tabla 4 agrupa nueve niveles de preparación tecnológica (TRL) en cuatro etapas de desarrollo de tecnología más amplias:

1. Investigación fundamental
2. Investigación y desarrollo
3. Piloto y demostración
4. Adopción temprana

La herramienta proporciona una descripción de cada TRL junto con una lista de verificación para determinar si la tecnología se encuentra en ese TRL específico. Los siguientes **principios** deben aplicarse al determinar el TRL de una tecnología:

- Comience con la etapa de desarrollo de tecnología más amplia: al determinar un TRL, es mejor comenzar con la etapa de desarrollo general de la tecnología antes de evaluar el TRL específico.
- Sea conservador: si existen incertidumbres sobre si una tecnología se encuentra en un TRL determinado, se debe asignar el TRL más bajo.
- Asegúrese de que se comprenda bien el entorno operativo: un aspecto clave de los diversos TRL es el entorno de prueba de una tecnología. Es importante tener claro las condiciones del mundo real esperadas y si el entorno de prueba (por ejemplo, laboratorio, simulación u operación) representa estas condiciones y de qué manera.
- Un TRL solo es válido para el entorno operativo específico para el que se probó: si una tecnología desarrollada se va a implementar en un entorno operativo diferente de aquel para el que se probó, la tecnología ya no se considerará completamente desarrollada y deberá probarse y perfeccionarse para que el nuevo entorno operativo se considere en el mismo TRL.
- Distinción importante: se dice que una tecnología ha alcanzado un TRL específico si ha cumplido con los requisitos para ese nivel y todos los niveles anteriores. Se dice que una tecnología está en un TRL determinado si el equipo de investigación está trabajando actualmente para lograr los requisitos específicos de ese nivel.

Tabla 4. Guía de autoevaluación de nivel de TRL para proyectos de FONTAGRO.

Etapa de Desarrollo Tecnológico	TRL	Definición	Descripción	Lista de verificación de actividades para alcanzar este nivel
Investigación Básica	1	Principios básicos observados y reportados	La investigación científica comienza con las propiedades de una tecnología potencial observada en el mundo físico. Estas propiedades básicas se están reportando en la literatura.	<input type="checkbox"/> Se han realizado actividades de investigación básica y se han definido los principios básicos <input type="checkbox"/> Se han publicado principios y hallazgos en la literatura (por ejemplo, artículos de investigación, artículos revisados por pares, libros blancos)
	2	Tecnología y/o aplicación de concepto formulado	La investigación aplicada comienza con la identificación de aplicaciones prácticas de principios científicos básicos. Se hace hincapié en comprender mejor la ciencia y corroborar las observaciones científicas básicas realizadas durante el trabajo TRL 1. Se está realizando un análisis de la viabilidad de las aplicaciones especulativas y se informa en estudios científicos.	<input type="checkbox"/> Se han identificado aplicaciones de principios básicos <input type="checkbox"/> Se han publicado aplicaciones y análisis de apoyo en la literatura (por ejemplo, estudios analíticos, pequeñas unidades de código para software, artículos que comparan tecnologías)
Investigación y Desarrollo	3	Prueba de concepto experimental	Se inicia la investigación y el desarrollo activos. Las aplicaciones están pasando de la etapa de papel al trabajo experimental. La viabilidad de los componentes tecnológicos separados se está validando a través de estudios analíticos y de laboratorio. Todavía no se ha intentado integrar los componentes en un sistema completo.	<input type="checkbox"/> Se ha desarrollado una prueba de concepto y/o una función crítica analítica y experimental <input type="checkbox"/> Se han validado componentes separados en un entorno de laboratorio
	4	Validación de componente(s) en un ambiente de laboratorio	Los componentes tecnológicos básicos se integran "ad hoc" para establecer que funcionarán juntos en un entorno de laboratorio. El sistema "ad hoc" probablemente sería una mezcla de equipo disponible y algunos componentes de propósito especial que pueden requerir un manejo, calibración o alineación especiales para funcionar.	<input type="checkbox"/> Se han validado componentes integrados "ad-hoc", subsistemas y/o procesos en un entorno de laboratorio <input type="checkbox"/> Se entiende cómo la integración "ad-hoc" y los resultados de las pruebas difieren de los objetivos esperados del sistema

Etapa de Desarrollo Tecnológico	TRL	Definición	Descripción	Lista de verificación de actividades para alcanzar este nivel
	5	Validación de componente(s) semiintegrado(s) en un entorno simulado	Los componentes tecnológicos básicos integrados funcionan para las aplicaciones previstas en un entorno simulado. Se están desarrollando configuraciones, pero pueden sufrir cambios fundamentales. La tecnología y el entorno en TRL 5 son más similares a la aplicación final que en TRL 4.	<input type="checkbox"/> Se han validado los componentes/subsistemas o procesos semiintegrados en un entorno simulado <input type="checkbox"/> Se entiende cómo el entorno simulado difiere del entorno operativo esperado y cómo los resultados de las pruebas se comparan con las expectativas
Piloto y demostración	6	Prototipo de sistema y/o proceso demostrado en un entorno simulado	Se está desarrollando un modelo o prototipo, que representa una configuración casi deseada, a escala piloto, generalmente más pequeña que la escala real. Se están realizando pruebas del modelo o prototipo en un entorno simulado.	<input type="checkbox"/> Se ha desarrollado un modelo o prototipo a escala piloto <input type="checkbox"/> El sistema de modelo o prototipo a escala piloto está cerca de la configuración deseada en cuanto a rendimiento y volumen, pero generalmente es más pequeño que el de escala real <input type="checkbox"/> Se ha demostrado el sistema de prototipo o prototipo a escala piloto en un entorno simulado <input type="checkbox"/> Se entiende cómo el entorno simulado difiere del entorno operativo y cómo los resultados difieren de las expectativas
	7	Prototipo de sistema listo (forma, ajuste y función) demostrado en un entorno operativo apropiado	Se está demostrando un prototipo a escala real en un entorno operativo, pero en condiciones limitadas (es decir, pruebas de campo). En esta etapa, el diseño final está muy cerca de completarse.	<input type="checkbox"/> Se ha desarrollado un prototipo a escala real con forma, ajuste y función listos <input type="checkbox"/> Se ha demostrado un prototipo a escala real en un entorno operativo, pero en condiciones limitadas
	8	Tecnología real completada y calificada mediante pruebas y demostraciones	Se está demostrando que la tecnología funciona en su forma final y en las condiciones esperadas. Esta etapa generalmente representa el final del desarrollo de la tecnología. En esta etapa, se comprenden bien las operaciones, se están desarrollando los procedimientos operativos y se están realizando los ajustes finales.	<input type="checkbox"/> Se ha desarrollado la configuración final de la tecnología <input type="checkbox"/> Se ha probado con éxito la configuración final en un entorno operativo <input type="checkbox"/> Se ha evaluado la capacidad de la tecnología para cumplir con sus requisitos operativos y se han documentado los problemas; se han determinado planes, opciones o acciones para resolverlos

Etapa de Desarrollo Tecnológico	TRL	Definición	Descripción	Lista de verificación de actividades para alcanzar este nivel
Adopción temprana	9	Tecnología real probada mediante una implementación exitosa en un entorno operativo	La aplicación real de la tecnología en su forma final se lleva a cabo en una amplia gama de condiciones operativas. En esta etapa, a veces denominada “operaciones del sistema”, se perfecciona y adopta la tecnología.	<input type="checkbox"/> La tecnología se ha implementado y probado con éxito en una amplia gama de condiciones operativas <input type="checkbox"/> Se han completado informes operativos, de prueba y de evaluación
Disponible comercialmente		Desarrollo tecnológico completado	La tecnología está disponible abiertamente en el mercado o se ha vendido directamente a un comprador del sector público o privado, en su estado actual o en su oferta de servicios para fines distintos de los de prueba o desarrollo. La tecnología es comercial y competitiva, pero puede requerir más esfuerzos de integración para lograr una adopción generalizada.	<input type="checkbox"/> La tecnología está disponible abiertamente en el mercado y/o se ha vendido en su estado actual de oferta de servicio para fines distintos de los de prueba o desarrollo.

Fuente: Gobierno de Canadá (2021). Adaptada de IEA (2020), U.S. GAO (2020). U.S. Department of Energy (2015), U.S. Department of Transportation (2017), U.S. Department of Defense (2023), European Commission (2017), and NYSERDA (2018), BCIP (2017).

Para iniciar la autoevaluación, esta consta de tres preguntas básicas:

1. **¿Qué tipo de soluciones se desarrollarán con el proyecto?** Esta es una pregunta en donde la matriz de Guía se debe usar en conjunto con las tablas sectoriales del Anexo A para determinar qué sector se puede usar como referencia. La respuesta a esta pregunta determinará la matriz sectorial a usarse. Si el proyecto tiene más de un resultado o tecnología, es posible que deba realizar su evaluación de TRL para más de un sector o tecnología.
2. **¿Qué le falta a su innovación para estar en su forma final?** Una vez determinada la matriz de referencia sectorial, esta pregunta evalúa la solidez y completitud del estado de la innovación/tecnología. Esta pregunta se debe utilizar para navegar en la tabla seleccionada en la Pregunta 1 el nivel de TRL. Si el proyecto se encuentra en un escenario con las principales características de la innovación ya establecidas, entonces este sigue siendo un prototipo (TRL 4 o 5). Por el contrario, si ya tienen la innovación en su forma final pero aún no está certificada ni lista para fabricarse a escala, el TRL puede aumentar hasta TRL 6 o 7, o solo TRL8-9, cuando ya puede ser comercial. La lista de verificación de actividades para alcanzar el nivel deseado en la Tabla 4, aplicadas a las tablas del Anexo A, facilita el establecer el nivel de TRL.
3. **¿Qué tan controladas están las condiciones en las que opera?** Esta pregunta mide la integridad del entorno de prueba, y complementa la pregunta 2. Esta pregunta se debe utilizar para navegar en el nivel de TRL. Cuanto más reales sean las condiciones (es decir, que puedan ocurrir elementos fuera de su control), más cerca estará del TRL9. Si prueba su innovación, independientemente de su forma en escenarios controlados, no está más allá del TRL6. Solo cuando haya probado su producto en vivo en marcos de tiempo relevantes, podrá decir que está en el TRL8. Obviamente, en aquellos mercados que se someten a regulaciones, el TRL está estrechamente vinculado a las fases que está concluyendo.

Con la matriz obtenida en la pregunta 1 y el valor TRL inferior obtenido de las respuestas en las preguntas 2 y 3, se puede calcular el TRL del proyecto. Se pueden utilizar los ejemplos en el Anexo A para comprobar que el proyecto y los ejemplos del Anexo A se encuentran en situaciones similares que justifican la evaluación de TRL.

La descripción de los diferentes niveles TRL se realiza para cada uno de los sectores según sus condiciones, teniendo en cuenta los elementos evaluados en las Preguntas 2 y 3. La completitud de la solución respecto a su forma final y la completitud del entorno de pruebas respecto a los entornos reales finales de aplicación. Se pueden usar los proyectos de FONTAGRO evaluados en la sección 2 como ejemplos de las tecnologías.

Los resultados de la autoevaluación se deben registrar de manera sistemática. El Anexo C incluye una matriz con la información básica de la autoevaluación, la cual debe ser reportada a FONTAGRO.

5. Conclusiones y Recomendaciones

4.1. Conclusiones

1. **TRL como una herramienta de medición de I+D+i de FONTAGRO.** Los niveles de TRL son una medida para estimar la madurez tecnológica de las tecnologías básicas de un programa durante el proceso de selección y en las fases posteriores de seguimiento y evaluación hasta que estas tecnologías, o los productos que las utilizan, alcancen la preparación para el mercado. La escala TRL es una métrica con nueve niveles de preparación tecnológica para describir la madurez de una tecnología desde la etapa de ideación (TRL-1) hasta el grado más alto de preparación para la aplicación/comercialización (TRL-9). Los niveles intermedios cubren el establecimiento de pruebas de concepto, desarrollos de prototipos, validaciones funcionales de modelos a entornos operativos reales y la eliminación de barreras regulatorias obligatorias entre niveles hacia la introducción en el mercado de estas tecnologías/productos. De esta manera, el TRL se vuelve en una herramienta para medir el nivel de desarrollo tecnológico de los proyectos de FONTAGRO.
2. **Evaluación de TRL a nivel de proyecto.** El avance del TRL apoyado por un proyecto específico muchas veces incorpora no solo los avances del mismo TRL evaluado, sino que puede integrar varios desarrollos del mismo proyecto pero otras tecnologías o beneficiarse de avances de otras tecnologías fuera del proyecto (otros proyectos). **TRL como herramienta de coordinación.** De acuerdo con NIFA, el TRL proporciona una manera de coordinar la investigación y monitorear el progreso entre múltiples grupos de investigación y asociaciones público-privadas para cadenas de valor completas desde el campo hasta el mercado. En este caso, por ejemplo, grupos de investigación que agrupan a Universidades e INIAs puede coordinarse mejor al clasificar las tecnologías en TRL. **Necesidad de evaluación de TRLs de proyectos de FONTAGRO.** Como muestra el análisis de la STA de FONTAGRO (2024), los resultados e impacto de FONTAGRO pueden medirse de acuerdo a su nivel inicial y final de TRL. Para dicho propósito, es necesario determinar el progreso de los TRLs a lo largo de la implementación del proyecto, por lo que se requiere una evaluación al inicio del proyecto y su avance estimado esperado para el final del proyecto. Los informes anuales y finales de FONTAGRO pueden proporcionar evaluaciones del progreso de la investigación basadas en el TRL de cada proyecto, de acuerdo a logros específicos que se definan para cada nivel. El TRL de investigación de cada proyecto debe complementar la descripción de los resultados y beneficios esperados que se describen para cada proyecto de FONTAGRO.
3. **Propuesta de Metodología de Evaluación de TRL.** En base a la experiencia de otros países y la evaluación de TRL de los proyectos de FONTAGRO, se propone una metodología para evaluar de manera sistemática los niveles de TRL de cada proyecto. Esta metodología está basada en la experiencia de otros países.

4.2. Recomendaciones

1. **Uso en la evaluación de propuesta de proyectos.** FONTAGRO puede utilizar la escala TRL como un factor para evaluar propuestas y proyectos. En ese sentido, el TRL permite a los postulantes y evaluadores alinearse con las expectativas de FONTAGRO en el contexto de

una Convocatoria de Propuestas y de los diferentes instrumentos, que pueden posicionarse en toda la escala de TRL.

2. **Integración de TRLs en el Marco de Resultados de FONTAGRO.** Se recomienda que todos los proyectos de FONTAGRO al momento de presentarse hagan una evaluación de su nivel de TRL usando la guía simplificada propuesta en este documento. El nivel inicial de TRL de cada proyecto se integrará al Marco de Resultados de FONTAGRO, para que de esa manera se pueda evaluar para cada proyecto el nivel inicial y final y determinar el cambio en TRL al final del proyecto.
3. **Convocatorias enfocadas a distintos niveles de TRL.** FONTAGRO podría hacer una distinción de las convocatorias de acuerdo con el nivel de TRL en coordinación con grupos de investigación (Universidades e INIAs) enfoque de las convocatorias. Por ejemplo, convocatorias de investigación e innovación pueden cubrir proyectos que comienzan en TRL 2-3 y que lleguen a TRL 5-6, mientras que convocatorias de innovación pueden cubrir proyectos que comienzan en TRL4-5 y terminan en TRL6-8.
4. **Alianzas estratégicas con otras agencias y donantes para financiar niveles específicos de TRL.** Para complementar el punto anterior, FONTAGRO en alianza con otras agencias y donantes podrían enfocarse en convocatorias con un enfoque en cambios de nivel de TRL. Por ejemplo, convocatorias enfocadas a financiar proyectos desde TRL 1-2 hasta alcanzar TRL 3-4, desde TRL 3-4 hasta llegar a TRL 5-6, o cofinanciar vía alianzas estratégicas compañías de sector privado para pasar de TRL 5 a TRL 9.
5. **Incorporación de TRL en Universidades e INIAs.** Dado el trabajo cercano de FONTAGRO con instituciones que hacen I+D (Universidades, INIAs), estas instituciones se beneficiarían en clasificar las tecnologías en TRL dada la posible mejora en coordinación ya señalados anteriormente, además de que les podría permitir evaluar los activos en dichas organizaciones, como producto directo de los esfuerzos de investigación.

6. Bibliografía

- Banke, J. (2010). Technology Readiness Levels Demystified. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://www.nasa.gov/aeronautics/technology-readiness-levels-demystified/>
- BIRAC. (2024). BIRAC-TRLs: Technology Readiness Levels by BIRAC across areas under Biotechnology. Biotechnology Industry Research Assistance Council (BIRAC). Consulado Junio 2024. https://www.birac.nic.in/desc_new.php?id=443
- British Council Indonesia. (2020). Newton Institutional Links: Annex 2 - Technology Readiness Level. <https://www.britishcouncil.id/en/programmes/education/newton-fund/newton-institutional-links>
- Build in Canada Innovation Program (BCIP). (2017). Build in Canada Innovation Program Definitions.
- Euraxess. (2024). About technology readiness levels. Accesado Octubre 2024: <https://euraxess.ec.europa.eu/career-development/researchers/manual-scientific-entrepreneurship/major-steps/trl>
- Government of Canada. (2021). Technology Readiness Level (TRL) Assessment Tool. <https://ised-isde.canada.ca/site/clean-growth-hub/en/technology-readiness-level-trl-assessment-tool>
- Hensen, J., M. Archontiki, R. Loonen & M. Kanellis. 2015. Using building simulation for moving innovations across the “Valley of Death”. Federation of European Heating, Ventilation and Air Conditioning Associations (REHVA) Journal 52, 58-62. <https://www.rehva.eu/rehva-journal/chapter/using-building-simulation-for-moving-innovations-across-the-valley-of-death>
- Horizon Europe. (2022). TRL assessment tool guide. <https://horizoneuropencpportal.eu/repository/7dc8e3bf-8c26-4134-9fca-0c9114fb799d>
- Horizon Europe. (2022). TRL assessment tool. <https://horizoneuropencpportal.eu/repository/71b2b25e-c6f9-4055-9c5c-1bc9f13e20d0>
- International Energy Agency (IEA). (2020). Technology Perspectives 2020: Special Report on Clean Energy Innovation Accelerating technology progress for a sustainable future.
- Manning, C.G. (2023). Technology Readiness Levels. National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://www.nasa.gov/directorates/somd/space-communications-navigation-program/technology-readiness-levels/>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (s.f.). Technology Readiness Level Definitions. Disponible en: https://www.nasa.gov/pdf/458490main_TRL_Definitions.pdf.
- National Institute of Food and Agriculture (NIFA). (2018). Crop Research Technology Readiness Level (TRL). U.S. Department of Agriculture, National Institute of Food and Agriculture Institute of Food Production and Sustainability. <https://www.nifa.usda.gov/sites/default/files/resources/Crop-Research-Technology-Readiness-Level-2018.pdf>

- New York State Energy Research and Development Authority (NYSERDA). (2018). NYSERDA Technology and Commercialization Readiness Level Calculator Tool.
- STA FONTAGRO. 2024. Impacto tecnológico de proyectos FONTAGRO. Secretaría Técnica Administrativa de FONTAGRO, Washington, DC.
- Strazza, C., N. Olivieri, A. De Rose, T. Stevens, T., L. Peeters, D. Tawil-Jamault, & M. Bruna. (2017a). Technology readiness level – Guidance principles for renewable energy technologies. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d5d8e9c8-e6d3-11e7-9749-01aa75ed71a1>
- Strazza, C., N. Olivieri, A. De Rose, T. Stevens, T., L. Peeters, D. Tawil-Jamault, & M. Bruna. (2017b). Technology readiness level – Guidance principles for renewable energy technologies: Annexes. European Commission, Directorate-General for Research and Innovation. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1da3324e-e6d0-11e7-9749-01aa75ed71a1>
- U.S. Government Accountability Office (USGAO). (2020). Technology Readiness Assessment Guide. Best Practices for Evaluating the Readiness of Technology for Use in Acquisition Programs and Projects. <https://www.gao.gov/products/gao-20-48g>
- U.S. Department of Defense. (2023). Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance. <https://www.cto.mil/wp-content/uploads/2023/07/TRA-Guide-Jun2023.pdf>
- U.S. Department of Energy. (2015). Technology Readiness Assessment Guide. <https://www.directives.doe.gov/directives-documents/400-series/0413.3-EGuide-04a-admchg1>
- U.S. Department of Transportation. (2017). Technology Readiness Level. <https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/ear/17047/index.cfm>
- U.S. Small Business Innovation Research program. (2014) Select Appendices: Appendix A Technology Readiness Level (TRL) Descriptions.

7. Anexos

Anexo A. Guías Sectoriales de TRL de BIRAC (India)

Tabla A1. Agricultura

Etapa	Nivel de TRL	Definición
Ideación	TRL 1	<ul style="list-style-type: none"> Indicar el desafío que enfrenta la industria u otros usuarios, y la necesidad de un nuevo tipo de innovación, como una variedad, una práctica u otra solución tecnológica. Estimar el valor de la solución innovadora en comparación con la variedad, la práctica u otras tecnologías existentes, y dónde encaja la solución en la cadena de suministro general.
Prueba de Principio	TRL 2	<ul style="list-style-type: none"> Selección Asistida por Marcadores: Recolección y análisis de genotipos de donantes (selección mediante inoculación natural y artificial en los puntos críticos/casas de selección) y validación de marcadores de ADN vinculados a genes/QTL para el rasgo particular de interés
		<ul style="list-style-type: none"> Transgénicos/Edición de genes: Ensamblaje del constructo con los casetes de genes de interés, marcadores de antibióticos, etc. y su clonación y estandarización del protocolo de transformación
		<ul style="list-style-type: none"> Bio-control: Aislamiento, purificación e identificación taxonómica de muestras microbianas
		<ul style="list-style-type: none"> Cultivo de Tejidos: Selección de material superior seguida de iniciación del cultivo, estandarización de los medios
Prueba de concepto demostrada y establecida	TRL 3-4	<ul style="list-style-type: none"> Selección Asistida por Marcadores: Realización de los cruces entre los progenitores donantes para generar la F1 y su análisis molecular
		<ul style="list-style-type: none"> Transgénicos/Edición de genes: Generación de transformantes putativos con el gen de interés, análisis PCR
		<ul style="list-style-type: none"> Bio-control: Optimización de medios para multiplicación masiva y desarrollo de sistemas de administración para los aislados eficientes seleccionados
		<ul style="list-style-type: none"> Cultivo de Tejidos: Optimización de medios para multiplicación de brotes y enraizamiento
Investigación en etapa avanzada	TRL 5	<ul style="list-style-type: none"> Selección Asistida por Marcadores: Desarrollo de líneas homocigóticas para el gen de interés mediante selección asistida por marcadores de primer plano y de fondo
		<ul style="list-style-type: none"> Transgénicos/Edición de genes: Integración y análisis de expresión del gen trans/cis en la generación T1
		<ul style="list-style-type: none"> Bio-control: Evaluación y cribado in vitro de cepas locales frente a patógenos o insectos objetivo
		<ul style="list-style-type: none"> Cultivo de Tejidos: Optimización de las condiciones para el endurecimiento y establecimiento de plantas en invernaderos/casas de malla

Etapa	Nivel de TRL	Definición
Validación en etapa temprana	TRL 6	<ul style="list-style-type: none"> • Selección Asistida por Marcadores: Fenotipado del rasgo homocigótico estabilizado en invernadero/invernadero de malla/campo (puntos calientes) mediante la aplicación de presión de selección y recuperación del genoma de fondo mediante marcadores moleculares
		<ul style="list-style-type: none"> • Transgénicos: Evaluación de las plantas transgénicas estables para su capacidad de expresar el rasgo de interés, su integridad y estudios de bioeficacia (en invernadero)
		<ul style="list-style-type: none"> • Bio-control: Prueba de bioeficacia de las formulaciones contra fitopatógenos/insectos seleccionados dentro del invernadero/invernadero de malla, estudios de almacenamiento y vida útil y estabilidad
		<ul style="list-style-type: none"> • Cultivo de Tejidos: Establecimiento de plantas de cultivo de tejidos en el campo para evaluación a escala limitada y pruebas de fidelidad genética
Validación en etapa avanzada	TRL 7	Realizar ensayos de campo extensos (en múltiples ubicaciones o puntos críticos) u otros experimentos de rendimiento tecnológico para determinar el rendimiento potencial y la calidad del producto.
Precomercialización	TRL 8	Producir materiales de plantación certificados u otros tipos de tecnologías y garantizar que se puedan obtener o que sean viables para la producción a gran escala. Además, se establecen la eficiencia operativa, los costos y los retornos o las mejoras en la calidad de los recursos que resultarían de la innovación.
Comercialización	TRL 9	La producción a escala comercial por parte de productores o fabricantes se produce con la entrega de productos a productores, manipuladores, procesadores, distribuidores u otros participantes de la cadena de suministro para los puntos de venta del mercado y para satisfacer la demanda de los usuarios.

Tabla A2. Biotecnología industrial (incluyendo agricultura secundaria)

Etapa	Nivel de TRL	Definición
Ideación	TRL 1	Estudio de la literatura; identificación del problema; definición y formulación de hipótesis
Prueba de Principio	TRL 2	Se iniciaron los experimentos analíticos a escala de laboratorio. Se observaron los principios básicos a partir de los estudios en placa/matraz. Los parámetros aún deben optimizarse.
Prueba de concepto demostrada	TRL 3	Concepto probado a escala de laboratorio en matraces. Optimización de parámetros a escala de laboratorio (a nivel de matraz)*.
Prueba de concepto establecida	TRL 4	Concepto probado a escala de laboratorio en experimentos a nivel de biorreactor en condiciones optimizadas a menos de 100 l. Se deben obtener las aprobaciones necesarias para utilizar OGM (RCGM/GEAC)
Validación en etapa temprana	TRL 5	Desarrollo de procesos (incluido el procesamiento posterior) para el aislamiento/mejora/extracción del producto a nivel de biorreactor a menos de 100 L
	TRL 6	Estabilidad del producto y repetibilidad del proceso para obtener un producto consistente. Desarrollo de un paquete tecnológico completo. Obtención de todas las autorizaciones regulatorias y ambientales para la ampliación a escala industrial con respecto a las pautas estándar, si corresponde.
Validación en etapa avanzada	TRL 7	Demostración a escala piloto de la tecnología (escala de 100 L o 100 Kg); Demostración de la tecnología en un entorno real
Precomercialización	TRL 8	Desarrollo de la tecnología en etapa avanzada (escala de hasta 1000 L o 1000 Kg)
Comercialización y estudios post mercado	TRL 9	Obtención de todas las autorizaciones regulatorias para la entrada al mercado y preparación para la comercialización

* La demostración de tecnología (para el desarrollo de la Prueba de Concepto) se considerará como TRL-3 en casos como la biorremediación (donde la misma no es posible a escala de laboratorio) y TRL-7 se demostrará en múltiples sitios.

Tabla A3. Inteligencia artificial, análisis de big data, internet de las cosas (IoT), desarrollo de software y bioinformática

Etapa	Nivel de TRL	Definición
Ideación	TRL 1	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad identificada, • Desarrollo de uso básico, propiedades básicas de la arquitectura de software, formulaciones matemáticas y algoritmos generales.
Prueba de Principio	TRL 2	<ul style="list-style-type: none"> • Ideas de investigación desarrolladas • Concepto de tecnología o aplicación formulada. • Realizar estudios analíticos y comenzar a codificar y comparar tecnologías de la competencia
Prueba de concepto demostrada	TRL 3	<ul style="list-style-type: none"> • El concepto/script pre-alfa está listo y se ha creado un borrador de trabajo.
Prueba de concepto establecida	TRL 4	<ul style="list-style-type: none"> • Desarrollo de entornos de funcionalidad limitada para validar propiedades críticas y predicciones analíticas utilizando componentes de software no integrados y datos parcialmente representativos. • Resultados de laboratorio que muestran la validación de propiedades críticas.
Validación en etapa temprana	TRL 5	<ul style="list-style-type: none"> • Tecnologías de software desarrolladas para integrar con diferentes aspectos del sistema existente. • Las implementaciones de tecnologías de software desarrolladas se ajustan al entorno/interfaces objetivo. Experimentos con problemas realistas. • Pruebas alfa rigurosas.
	TRL 6	<ul style="list-style-type: none"> • Se demuestra la viabilidad de la tecnología de software en problemas realistas a escala real. • Validación de la tecnología en un entorno relevante de extremo a extremo. • Pruebas beta rigurosas
Validación en etapa avanzada	TRL 7	<ul style="list-style-type: none"> • Pruebas y validaciones rigurosas por parte de terceros
Precomercialización	TRL 8	<ul style="list-style-type: none"> • Calidad de software ISO/IEC 9126 según estándares internacionales • Privacidad y protección de datos según estándares internacionales (puede cumplirse según las normas HIPAA) • Lanzamiento del software
Comercialización y estudios post mercado	TRL 9	<ul style="list-style-type: none"> • Mejora continua (nuevas versiones) según la demanda y los comentarios de los usuarios. • Incorporación continua de nuevas funciones según la demanda y los comentarios de los usuarios.

Tabla A4. Veterinaria

Etapa	Nivel de TRL	Definición
Ideación	TRL 1	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad identificada, principios básicos observados y/o informados (la investigación científica comienza a traducirse en investigación y desarrollo aplicados)
Prueba de Principio	TRL 2	<ul style="list-style-type: none"> • Ideas de investigación desarrolladas, hipótesis formuladas y protocolos desarrollados (la idea debe probarse en el nivel de investigación preliminar mediante estudios in vitro)
Prueba de concepto demostrada	TRL 3	<ul style="list-style-type: none"> • Medicamentos/Vacunas: Caracterización inicial de la molécula objetivo para determinar actividad biológica mediante estudios in vitro. • Dispositivos: Estudios analíticos y de laboratorio para validar físicamente las predicciones analíticas de elementos separados de la tecnología. • Diagnósticos: Expresión y purificación del agente de diagnóstico, su caracterización y validación inicial a nivel de laboratorio mediante ensayos inmunológicos estándar.
Prueba de concepto establecida	TRL 4	<ul style="list-style-type: none"> • Medicamentos/Vacunas: Optimización de la producción de la molécula objetivo en un fermentador a escala de laboratorio (1 a 2 L). Purificación y validación biológica de la molécula en condiciones de laboratorio (utilizando inmunoensayos estándar y comparándolos con ensayos estándar de oro) • Dispositivos: Se integran los componentes físicos básicos para establecer que funcionarán juntos (primera prueba de laboratorio) • Diagnósticos: Caracterización física y biológica de los antígenos candidatos producidos en diferentes lotes (alrededor de 5 lotes)
Validación en etapa temprana	TRL 5	<ul style="list-style-type: none"> • Medicamentos/Vacunas: Demostración de la prueba de concepto (PoC) en un número limitado de animales (mediante estudios serológicos). Trabajo en el desarrollo de una formulación viable y realización de estudios de seguridad y eficacia. • Dispositivos: Integración de componentes en laboratorio de “alta fidelidad”. Los componentes tecnológicos básicos se integran con elementos de apoyo razonablemente realistas para que puedan probarse en un entorno simulado. • Diagnósticos: Establecer todos los kits de diagnóstico para que tengan la especificidad y sensibilidad deseadas en función de los datos generados.
	TRL 6	<ul style="list-style-type: none"> • Medicamentos: Establecimiento de la vida útil del medicamento. Realización de estudios de toxicidad en el modelo animal de laboratorio. • Dispositivos: Modelo representativo o sistema prototipo probado en un entorno relevante (un entorno de laboratorio de alta fidelidad o en un entorno operativo simulado).

Etapa	Nivel de TRL	Definición
		<ul style="list-style-type: none"> • Vacunas: Evaluación de la duración de la respuesta inmunitaria, la vida útil y la toxicidad en animales de experimentación/especies objetivo. Realizar estudios de provocación con animales siempre que sea posible. • Diagnósticos: Realizar una evaluación exhaustiva en el campo.
Validación en etapa avanzada	TRL 7	<ul style="list-style-type: none"> • Medicamentos/Vacunas: Ampliar la escala en condiciones de buenas prácticas de fabricación actuales y realizar ensayos de campo exhaustivos. Confirmar aún más mediante estudios de desafío siempre que sea posible. Validación de terceros, preferiblemente agencias gubernamentales • Dispositivos: Prototipo cercano, es decir, demostración de un prototipo de sistema real en un entorno operativo. Prototipo final producido y demostrado. • Diagnósticos: Validación de terceros, preferiblemente agencias gubernamentales
Precomercialización	TRL 8	<ul style="list-style-type: none"> • Aprobación reglamentaria para la nueva solicitud y otorgamiento de licencia de fabricación comercial para su introducción en el mercado
Comercialización y estudios post mercado	TRL 9	<ul style="list-style-type: none"> • Lanzamiento comercial, estudios posteriores a la comercialización y vigilancia

Tabla A5. Acuicultura y Pesca

Etapa	Nivel de TRL	Definición
Ideación	TRL 1	Principios básicos de la tecnología observados e reportados
Prueba de Principio	TRL 2	Tecnología/aplicación desarrollada, formulada y protocolos desarrollados.
Prueba de concepto demostrada	TRL 3	Investigación activa iniciada, síntesis y caracterizaciones del producto mediante estudios de laboratorio.
Prueba de concepto establecida	TRL 4	Producción a escala piloto, caracterizaciones y validación de la tecnología en un entorno de laboratorio
Investigación en etapa avanzada	TRL 5	Tecnología de componentes y/o subsistemas básicos probada/validada en condiciones controladas en tanques más pequeños en un laboratorio/criadero con el control adecuado siguiendo protocolos diseñados estadísticamente
Validación en etapa temprana	TRL 6	Modelo o prototipo de tecnología de sistema o subsistema en un estanque relevante [entorno operativo] siguiendo métodos diseñados estadísticamente con controles adecuados. Aprobación regulatoria si corresponde
Validación en etapa avanzada	TRL 7	La tecnología del sistema/subsistema debe estar lista para su transferencia al usuario final después de obtener la aprobación regulatoria de una agencia de renombre
Precomercialización	TRL 8	Validación de terceros, preferiblemente agencias gubernamentales, aprobación regulatoria para la nueva aplicación y otorgamiento de licencia de fabricación comercial para su introducción en el mercado
Comercialización y estudios post mercado	TRL 9	Lanzamiento comercial, estudios posteriores a la comercialización y vigilancia

Anexo B. Nivel de Madurez Tecnológica (TRL) en Indonesia

Tabla B1. TRLs para Agricultura, Pesca y Ganadería

Nivel	Definición / Status	Indicador
1	Se han observado los principios básicos de la tecnología.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Formulación de preguntas de investigación o hipótesis de investigación; 2. Se ha realizado una revisión de literatura sobre los principios básicos relacionados con la investigación; y 3. Se dispone de los medios/métodos/procesos/productos que se van a observar y desarrollar y tienen potencial de éxito.
2	Se ha formulado el concepto de tecnología y aplicación.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se han identificado los medios y las infraestructuras a utilizar; 2. Se han validado los resultados de los estudios bibliográficos; y 3. Se han identificado los diseños de investigación teóricos y empíricos.
3	El concepto esencial y las características de la tecnología han sido probados analítica y experimentalmente.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se ha preparado el diseño de la investigación (metodología seleccionada, fases y datos necesarios para la investigación); 2. Se ha comprobado que los componentes del sistema tecnológico funcionan bien desde el punto de vista teórico, empírico y experimental; y 3. La tecnología es científicamente factible (estudio analítico, modelo/simulación, experimento).
4	Los componentes tecnológicos han sido validados en el entorno de laboratorio.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se han realizado pruebas de laboratorio de cada componente por separado; 2. El rendimiento de cada componente de la tecnología (medio/método/proceso/producto) que se va a desarrollar ha demostrado un buen resultado; 3. Se ha realizado un experimento sobre las funciones principales de la tecnología en un entorno relevante; 4. Se ha creado un prototipo a escala de laboratorio de la tecnología; 5. Se ha iniciado la investigación sobre la integración de componentes; 6. El análisis inicial muestra que las funciones principales necesarias funcionan bien; y 7. Se han probado (baja fidelidad) la integración de componentes y el diseño e ingeniería de la tecnología a escala de laboratorio.
5	Los componentes tecnológicos han sido validados en un entorno relevante.	<ol style="list-style-type: none"> 1. El prototipo de la tecnología está listo para ser probado en condiciones de laboratorio modificadas para asemejarse al entorno real; 2. Se ha aumentado la precisión y la fidelidad; 3. La integración de los componentes de la tecnología se ha probado con alta precisión (alta fidelidad).
6	El modelo o prototipo ha sido probado en un entorno relevante.	<ol style="list-style-type: none"> 1. Se han identificado los requisitos de la tecnología (condición óptima);

Nivel	Definición / Status	Indicador
		2. La tecnología se ha probado con gran precisión en una simulación del entorno operativo con datos completos (corresponde al diseño de la investigación); 3. Los resultados de las pruebas indican la viabilidad de la ingeniería; y 4. Se dispone de un borrador del análisis económico (estimación inicial de la viabilidad económica).

Fuente: Anexo 2, British Council Indonesia (2020).

Anexo C. Matriz de registro de TRL para proyectos de FONTAGRO

No.	Tecnología	Descripción de la Tecnología o el problema	TRL Inicial	TRL Final	Resultado o producto esperado
1					
2					
3					
4					
5					