

Niveles de madurez tecnológica: una oportunidad para categorizar los productos de Cenipalma

Technology readiness levels (TRL): an opportunity to categorize Cenipalma products

CITACIÓN: Rivera, Y. D., & Romero, H. M. (2023). Niveles de madurez tecnológica: una oportunidad para categorizar los productos de Cenipalma. *Palmas*, 44(3), 70-83.

PALABRAS CLAVE: ciencia, desarrollo tecnológico, disponibilidad, innovación, investigación, tecnología.

KEYWORDS: availability, innovation, research, science, technological development, technology.

YURANY DAYANNA RIVERA MÉNDEZ
Investigadora Asociada
Dirección de Investigación, Cenipalma

HERNÁN MAURICIO ROMERO
Dirección de Investigación, Cenipalma
Departamento de Biología, Universidad
Nacional de Colombia
Autor para correspondencia:
hromero@cenipalma.org

Resumen

Cenipalma despliega actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación que se enmarcan en la gestión de proyectos de ciencia, tecnología e innovación. Con el fin de garantizar la pertinencia, calidad y factibilidad de estos proyectos, se estableció el marco conceptual para identificar el alcance con base en el Nivel de Madurez Tecnológica o

TRL (por sus siglas en inglés de *Technology Readiness Level*) de los productos esperados para las próximas vigencias. Hay nueve niveles de madurez tecnológica, que se extienden desde los principios básicos de la tecnología o TRL 1 (nivel más bajo: mínima disponibilidad) hasta llegar con éxito a un entorno real o TRL 9 (nivel más alto: máxima disponibilidad). Por lo tanto, si se considera una tecnología concreta y se tiene información del TRL o nivel en el que se encuentra, se podrá reconocer su nivel de disponibilidad. Mediante la ejemplificación del desarrollo e implementación de la tecnología de Polinización artificial, se diseñó una guía para determinar el TRL de un proyecto con base en la definición de los parámetros característicos de cada nivel y su oportunidad de disponibilidad (*readiness*). De esta manera, la identificación del TRL en los proyectos de Cenipalma es una oportunidad para: aprobar la realización de un nuevo proyecto antes de su inicio o definir el plan de inversión de una segunda fase, decidir sobre la pertinencia de llevar una tecnología a un nivel más avanzado de desarrollo, contar con una evaluación prospectiva de la(s) tecnología(s) que conlleve a afinar los resultados esperados de un proyecto e incrementar las oportunidades de financiación por parte de entidades externas.

Abstract

Cenipalma conducts scientific research, technological development, and innovation activities as part of its management of science, technology, and innovation projects. To ensure the clarity, quality, and feasibility of these projects, we have established a conceptual framework to define the scope based on the expected Technology Readiness Level (TRL) of the products for upcoming periods. There are nine levels of technological readiness, ranging from the basic principles of the technology (TRL 1, the lowest level with minimum readiness) to successful testing in a real environment (TRL 9, the highest level with maximum readiness). Therefore, if a specific technology is considered, and its TRL level is known, its readiness level can be determined. Through the example of developing and implementing artificial pollination technology, a guide was designed to determine the TRL of a technology based on defining its characteristic parameters of each level and readiness. Thus, the identification of the TRL in Cenipalma projects is an opportunity to: approve the implementation of a new project before its start or define the investment plan for a second phase, decide on the relevance of bringing a technology to a more advanced level of development, have a prospective evaluation of the technology(s) that leads to fine-tuning the expected results of a project and increasing financing opportunities from external entities.

1. Introducción

Cenipalma despliega actividades de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación (I+D+i), que son sistemáticas e inician con el entendimiento y búsqueda de aplicación de los fenómenos y hechos observables, y terminan con la introducción e implementación de soluciones a problemas o aprovechamiento de oportunidades del sector palmero colombiano, para que sea más competitivo y sostenible. Para ello, la Dirección de Investigación organiza, planea, promueve, evalúa y hace seguimiento y con-

trol a la investigación en torno a la agroindustria de la palma de aceite, y, además, posibilita la apropiación del conocimiento y su materialización en productos (bienes y/o servicios) y procesos por parte del sector palmero, en articulación con la Dirección de Extensión y la Gerencia de Innovación y Desarrollo de productos. De esta manera, las actividades de I+D+i que adelanta Cenipalma cumplen las condiciones que establece el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias) (2021) para el cierre de brechas, la sostenibilidad y la productividad del sector productivo en colaboración con la academia y el Gobierno:

1.1. Investigación científica

Comprende el trabajo creativo llevado a cabo de forma sistemática, para incrementar el volumen de conocimientos o generar nuevo conocimiento y, de esta manera, adquirir un profundo entendimiento de los fenómenos objeto de estudio y de las posibles aplicaciones que podrán realizarse a futuro. La investigación científica engloba tres modalidades: investigación básica, investigación aplicada y desarrollo experimental, siendo estas dos últimas las que adelanta Cenipalma:

- Investigación básica: consiste en trabajos experimentales o teóricos que se emprenden principalmente para obtener nuevos conocimientos acerca de los fundamentos de los fenómenos y hechos observables, sin pensar en darles ninguna aplicación o utilización determinada.
- Investigación aplicada: también está relacionada con trabajos originales realizados para adquirir nuevos conocimientos; sin embargo, está dirigida fundamentalmente hacia un objetivo práctico específico. Se emprende para determinar los posibles usos de los resultados de la investigación básica o nuevos métodos o formas de alcanzar objetivos específicos predeterminados. Ejemplo: identificación del poder biocida de aislamientos de *Trichoderma* sp. mediante evaluación *in vitro* e *in vivo*.
- Desarrollo experimental: se trata de trabajos sistemáticos fundamentados en los conocimientos existentes obtenidos por la investigación o la experiencia práctica, con el fin de fabricar nuevos materiales, productos o dispositivos, establecer nuevos procedimientos, sistemas o servicios o mejorar considerablemente los que ya existen. Ejemplo: análisis del comportamiento del aceite de palma en el desarrollo de biopavimentos.

1.2. Desarrollo tecnológico

Consiste en la aplicación de los resultados de la investigación, dirigida a la fabricación de nuevos materiales o productos; el diseño de nuevos procesos, sistemas de producción o prestación de servicios, y el mejoramiento tecnológico sustancial de materiales, productos, procesos o sistemas preexistentes.

Esta actividad incluye la materialización de los resultados de la investigación en un plano, esquema o diseño, prototipos no comercializables, proyectos de demostración inicial, modelos de validación o proyectos piloto, siempre que los mismos no se conviertan o utilicen en aplicaciones industriales o para su explotación comercial. Se considera como la primera fase de la innovación y se diferencia de los proyectos de desarrollo experimental en que, en este tipo de investigaciones, existe una solución teórica a un problema, pero todavía no reúne las condiciones necesarias para el desarrollo de un prototipo comercial. Ejemplo: diseño de una planta piloto para el procesamiento de racimo del híbrido OxG.

1.3. Innovación

Comprende la introducción de un producto (bien o servicio) o proceso nuevo o significativamente mejorado, o la creación de un nuevo método de comercialización o de organización aplicado a prácticas de negocio, organización del trabajo o relaciones externas organizativas. Su principal objetivo es introducir un producto en el mercado o implementar un nuevo proceso a escala industrial o un método organizativo en todas las áreas involucradas.

- Innovación en producto (bien o servicio): busca la introducción para un sector, una región o un país de productos nuevos o significativamente mejorados; es decir, que se modifican algunas características de manera tal que tengan mejor desempeño respecto a sus propiedades o a sus posibles usos. Ejemplo: introducción al mercado del Polinizador Artificial con ácido naftalenacético (ANA).
- Innovación de proceso: se orienta a la introducción de nuevos procesos, para la producción o distribución de un producto o prestación de un servicio nuevo o significativamente mejorado, para optimizar el desempeño de procesos en términos de reducción de costos e incremento de la capacidad (se enfoca en el mejoramiento de la forma como se realiza un producto). Ejemplo: implementación de una tecnología para medir el potencial industrial de aceite.
- Innovación organizacional: está dirigida a la creación y aplicación de nuevos modelos organi-

zacionales de una empresa y está enfocada principalmente en las personas y/o organización del trabajo. Ejemplo: sistema de gestión de proyectos de Cenipalma.

Estas actividades se enmarcan en la iniciación, planificación, ejecución y cierre de proyectos de Ciencia, Tecnología e Innovación (CTeI), los cuales, para Cenipalma, son financiados por el Fondo de Fomento Palmero o con recursos de inversión del Gobierno nacional, entidades territoriales, el Sistema General de Regalías y otras fuentes públicas o privadas. Estos proyectos son esfuerzos temporales (con un inicio y un fin), que se llevan a cabo para crear un producto (bien, servicio o resultado) único y verificable de CTeI para el palmicultor, que responden a la oferta tecnológica que se definió en el direccionamiento estratégico de las Líneas de Investigación y Extensión.

Por ello, con el objetivo de garantizar la pertinencia, calidad y factibilidad de los proyectos de CTeI liderados desde la Dirección de Investigación y la Dirección de Extensión de Cenipalma, se buscó identificar el alcance de sus actividades de I+D+i, con base en el nivel de madurez tecnológica de los productos (entregables) esperados para las próximas vigencias. La identificación se realizó en términos del Nivel de Madurez Tecnológica o TRL (por sus siglas en inglés de *Technology Readiness Level*), concepto que concibe la tecnología como la suma de técnicas, habilidades, métodos y procesos que son utilizados en la producción de bienes y/o servicios (Fierro *et al.*, 2021; [1]).

Los TRL son un sistema de medición creado por la NASA a mediados de la década de los años 70, para evaluar el nivel de madurez de una tecnología en particular. Posteriormente, su uso se generalizó para cualquier proyecto desde su idea original hasta su despliegue (no necesariamente para proyectos aeronáuticos o espaciales). Cada tecnología se evalúa según los parámetros de cada nivel y luego se le asigna una calificación TRL, basada en su disponibilidad (*readiness*) (Minciencias, 2018). Hay nueve niveles de madurez tecnológica, que van desde los principios básicos de la tecnología o TRL 1 (nivel más bajo: mínima disponibilidad) hasta llegar con éxito a un entorno real o TRL 9 (nivel más alto: máxima disponibilidad). Por lo tanto, si se considera una tecnología concreta y se tiene información del TRL o nivel en

el que se encuentra, se podrá reconocer su nivel de disponibilidad (Minciencias, 2017).

De acuerdo con Minciencias (2017, 2018; [1]), cuando una tecnología está en TRL 1, comienza la investigación científica y sus resultados se traducen en investigación y desarrollo futuros. TRL 2 ocurre una vez que se han estudiado los principios básicos y se pueden proponer aplicaciones prácticas a hallazgos obtenidos inicialmente; sin embargo, la tecnología en este nivel es muy especulativa, ya que hay poca o ninguna prueba experimental de concepto. En el TRL 3 comienza la investigación y el diseño activo de una tecnología, para lo cual, generalmente, se requieren estudios tanto analíticos como de laboratorio para ver si una tecnología es viable y está lista para continuar con el proceso de desarrollo; se construye entonces un modelo de prueba de concepto. En TRL 4 se pueden llevar a cabo fácilmente modificaciones en los componentes de la tecnología. En TRL 5 continúan las pruebas con varios componentes y la tecnología se somete a ensayos más rigurosos y a simulaciones en entornos que sean lo más realistas posibles. En TRL 6 se tiene un prototipo o modelo representacional completamente funcional en un entorno relevante; es decir, cuyas condiciones se aproximan o simulan suficientemente a las existentes en un entorno real (o de misión). En TRL 7 se requiere que el modelo o prototipo funcional se demuestre en un entorno real. La tecnología TRL 8 ha sido probada y “calificada para vuelo”; esto significa que está lista para su implementación en un sistema tecnológico ya existente. Una vez que una tecnología ha sido implementada con éxito, se puede denominar TRL 9 (Tabla 1).

La aplicación práctica de los TRL se relaciona con: (i) la comprensión común del estado de madurez o disponibilidad de una tecnología, que permita gestionar con mayor precisión el alcance y el riesgo de un determinado proyecto; (ii) la priorización de proyectos en función de los diferentes niveles de madurez tecnológica que se pretenda considerar; (iii) el reconocimiento del punto de partida (TRL inicial) y de llegada (TRL final) de un nuevo proyecto para financiar:

- Si lo que se quiere es conllevar el ciclo de vida completo de la tecnología que se pretende desarrollar, se debe partir desde el TRL 1 con una primera idea novedosa hasta llegar a la prueba de concepto en el TRL 3. Posteriormente se abor-

daría el desarrollo tecnológico (TRL 4 - TRL 7) hasta su validación y, finalmente, su puesta en el mercado y despliegue (TRL 8 - TRL 9).

- Cuando el proyecto parte del nivel de prueba de concepto (TRL 3), al final se podría disponer de un producto comercial (TRL 8 - TRL 9) luego de llevar a cabo actividades de desarrollo, pruebas e industrialización, entre otros, antes de acceder al mercado.
- Si los esfuerzos se centran en el desarrollo tecnológico, habría que comenzar con una tecnología validada a nivel de prueba de concepto (TRL 3) y centrarse en los niveles TRL 4 - TRL 7, con un desarrollo tecnológico más cercano al mercado según se aproxima al nivel TRL 8.
- Finalmente, los proyectos de innovación que exigen la introducción del producto nuevo o mejorado en el mercado se deben abordar en los mayores niveles (TRL 8 - TRL 9).

Por otro lado, las actividades de divulgación científica, formación de recurso humano, servicios tecnológicos, asesoría y consultoría, y apropiación social del conocimiento son complementarias a las labores de I+D+i realizadas en el proyecto, aunque pueden tener mayor énfasis en algunos niveles de madurez tecnológica, y eso corresponde a mayor intensidad de color de la actividad en los TRL respectivos (Figura 1).

El sistema del TRL está presente en las actividades de I+D+i de Cenipalma y constituye una gran oportunidad para precisar la oferta tecnológica que se define a través de los entregables de los proyectos de Investigación y Extensión. Prueba de ello se ejemplifica con el desarrollo e implementación de la tecnología de Polinización artificial, que implicó varios proyectos de CTeI liderados por los programas de Biología y Mejoramiento, Validación y la Gerencia de Innovación y Desarrollo (Tabla 2).

Tabla 1. Correspondencia y características de cada TRL. Adaptado de Bedoya y Gómez (2021), Ibáñez (2021) y Minciencias (2017, 2018; [1]).

	TRL	Parámetros esperados al final del nivel. Si no se cumplen, se encuentra en un nivel inferior de TRL	Producto de CTeI
1 Principios básicos observados y reportados	• La investigación científica básica se ha completado y comienza la transición a la investigación aplicada. • Los principios básicos de la idea han sido cualitativamente postulados, observados y reportados. • Las herramientas descriptivas pueden ser formulaciones matemáticas o algoritmos. • No existe todavía ningún grado de aplicación comercial.	• La investigación científica inicial ha culminado: ¿los principios fundamentales de la idea han podido ser postulados y observados? • ¿Se cuenta con alguna publicación sobre los principios básicos de la investigación? • Posible resultado: publicación revisada por pares sobre los principios del concepto o aplicación tecnológica propuesta.	• Artículo de investigación A1, A2, B y C; D. • Notas científicas: publicadas en revistas indexadas e índices bibliográficos.
2 Concepto y/o aplicación tecnológica formulada	• La teoría y principios científicos se enfocan en formular eventuales usos o aplicaciones para definir el concepto (investigación aplicada). Se han desarrollado herramientas analíticas para la simulación o análisis de la aplicación; sin embargo, puede no haber pruebas o análisis que confirmen o validen las suposiciones de aplicación. • La evidencia se basa en publicaciones que describen una aplicación y proveen un análisis para confirmar el concepto.	• ¿Se han identificado eventuales usos o aplicaciones prácticas de la tecnología; es decir, se ha iniciado la investigación aplicada? • ¿Se cuenta con evidencia documental sobre la viabilidad de la aplicación y como fuente para confirmar el concepto? • ¿Ha sido identificada alguna solución de diseño empírica o teórica? • ¿Se han identificado potenciales <i>stakeholders</i> e impactos relevantes?	• Libros resultado de investigación. • Capítulos en libro, como resultado de investigación.

	TRL	Parámetros esperados al final del nivel. Si no se cumplen, se encuentra en un nivel inferior de TRL	Producto de CTel
2 Concepto y/o aplicación tecnológica formulada	- Se llevan a cabo pequeños estudios o experimentos que proporcionan información para las posteriores pruebas de concepto de la tecnología. - Se formula el plan de desarrollo y puesta en práctica de la tecnología y se identifican potenciales impactos y <i>stakeholders</i> relevantes. - El tema de propiedad intelectual cobra interés sobre ventajas competitivas en el mercado y el derecho de explotación y/o no infracción por uso de la tecnología.	¿Se han desarrollado estudios analíticos o pequeños experimentos para confirmar los principios básicos de la tecnología? ¿Han sido formulados el concepto de la tecnología, su aplicación y puesta en práctica? Posible resultado: publicación o referencia documental revisada por pares que describa las aplicaciones de la nueva tecnología.	- Artículo de investigación A1, A2, B y C; D. - Notas científicas: publicadas en revistas indexadas e índices bibliográficos. - Libros resultado de investigación. - Capítulos en libro, como resultado de investigación.
3 Prueba de concepto experimental	- Incluye la realización de pruebas analíticas, pruebas de concepto o a escala bajo condiciones controladas (en laboratorio), para medir parámetros, validar físicamente las predicciones (modelado y simulación) y demostrar la factibilidad técnica de los conceptos tecnológicos (I+D). - Los componentes de la tecnología han sido validados a escala de laboratorio, aunque esto no derive en la integración de todos los elementos en un sistema completo. - El trabajo ha evolucionado de un artículo científico a desarrollo experimental que verifica que el concepto funciona según lo esperado. - Se ha identificado el potencial de los materiales y cuestiones de escalamiento. - Inicia la validación del posible producto y/o mercado con <i>stakeholders</i> relevantes.	¿Han sido identificados los componentes de la tecnología? ¿Se ha demostrado la viabilidad técnica de los componentes y del concepto de la tecnología a escala de laboratorio? ¿Se han realizado estudios o exploraciones sobre los aspectos regulatorios (comités de ética, normas, ISO's o certificaciones) requeridos para el desarrollo? Posible resultado: prueba de desempeño o resultados analíticos o experimentales (en laboratorio) de parámetros clave de la tecnología.	- Artículos de investigación. - Libros resultado de investigación. - Capítulos en libros resultados de investigación.
4 Tecnología validada en condiciones controladas (laboratorio)	- Los niveles del 4 al 6 representan el puente entre la investigación científica y el desarrollo tecnológico. - Los componentes individuales de la tecnología han sido identificados y se busca establecer si funcionarán de manera integrada como un sistema en un entorno de laboratorio. - Se contemplan diseños preliminares de la tecnología. - La unidad de prototipo ha sido construida en un entorno controlado. - La simulación de los procesos permite identificar el potencial de escalamiento de la tecnología y sus cuestiones operativas.	¿Han sido integrados los componentes principales de la tecnología? ¿Se cuenta con un prototipo –así sea incompleto o por mejorar– del desarrollo? ¿Se han completado las pruebas iniciales de los componentes integrados en un entorno de laboratorio? ¿Se ha identificado el potencial de escalamiento de la tecnología? Posible resultado: prueba de desempeño de la tecnología realizada en laboratorio.	Productos tecnológicos patentados o en proceso de solicitud de patente.

	TRL	Parámetros esperados al final del nivel. Si no se cumplen, se encuentra en un nivel inferior de TRL	Producto de CTel
5 Tecnología validada en entorno relevante	- Los elementos básicos de la tecnología se integraron de manera que la configuración del sistema es similar a su aplicación final en casi todas sus características. - El prototipo (sistema integrado) está listo para simularse en un entorno relevante; sin embargo, su operatividad podría ocurrir aún a nivel de laboratorio. - El rendimiento del prototipo se ha simulado en el entorno relevante. - Se realizan evaluaciones del ciclo de vida y modelos de evaluación técnica y económica del diseño inicial. - Se identifican los requisitos para su escalamiento: salud y seguridad, limitaciones ambientales y regulatorias, y/o disponibilidad de recursos (materias primas, equipos, infraestructura).	¿Los elementos de la tecnología se integraron y el prototipo se ha evaluado en un entorno relevante? ¿Se han considerado los requisitos para la producción (salud y seguridad, ambiente, regulaciones y/o disponibilidad de recursos) a una escala mayor? ¿El prototipo cuenta con evaluación del ciclo de vida y viabilidad técnica y económica? <u>Posible resultado</u>: prueba de desempeño sobre componentes validados en entorno relevante (permite prever el rendimiento en el entorno operativo).	- Productos tecnológicos patentados o en proceso de solicitud de patente. - Variedades vegetales. - Productos de investigación, creación en artes, arquitectura y diseño. - Productos tecnológicos certificados o validados: diseños industriales, esquemas de circuitos integrados, <i>software</i>, plantas piloto, prototipos industriales y signos distintivos.
6 Tecnología demostrada en entorno relevante	- La mayoría de los problemas identificados previamente han sido resueltos. - Los componentes y procesos se han escalado para demostrar el potencial en condiciones reales. - El prototipo ha superado las pruebas en condiciones muy cercanas a las de funcionamiento real, cuenta con diseño detallado, estrategia de escalamiento y documentación. - El sistema a escala comercial ha sido modelado, y la evaluación económica y del ciclo de vida se ha completado. - La demostración de mercado (<i>early adopters</i>) y/o la apropiación social con <i>stakeholders</i> ha iniciado.	¿Han sido escalados los componentes y procesos? ¿El prototipo ha sido validado técnica y económicamente por una empresa con buenos resultados, y estos resultados han sido documentados? ¿Se inició la demostración de mercado (<i>early adopters</i>) o de apropiación social con posibles usuarios? ¿Ha sido modelado el sistema a escala comercial? ¿Se hizo el levantamiento de requerimientos para la producción y el despliegue del prototipo? <u>Posible resultado</u>: pruebas de viabilidad del prototipo en entorno relevante.	- Productos tecnológicos patentados o en proceso de solicitud de patente. - Variedades vegetales. - Productos de investigación, creación en artes, arquitectura y diseño.
7 Demostración del prototipo de sistema en entorno real	- Los asuntos tecnológicos menores han sido resueltos. - Se realiza la primera corrida piloto e inician las pruebas en entorno real. - Se identifican los aspectos relacionados con la producción e implementación de la tecnología, y se ha perfeccionado la evaluación económica y de su ciclo de vida. - Prototipo completo y funcional, próximo a operar o ya está operando en escala pre-comercial. - El sistema se ha validado con <i>stakeholders</i>. - La documentación disponible demuestra que la tecnología funciona en entorno real.	¿Se identifican los aspectos relacionados con la producción e implementación en escala pre-comercial? ¿Se cuenta con un prototipo completo, funcional y listo para prueba con primeros usuarios? ¿Se ha demostrado el éxito de la tecnología en un entorno operacional (con <i>stakeholders</i> reales)? <u>Posible resultado</u>: pruebas de viabilidad del prototipo en entorno operativo.	Productos tecnológicos certificados o validados: diseños industriales, esquemas de circuitos integrados, <i>software</i>, plantas piloto, prototipos industriales y signos distintivos.

	TRL	Parámetros esperados al final del nivel. Si no se cumplen, se encuentra en un nivel inferior de TRL	Producto de CTel
8 Sistema completo y certificado	• Los componentes están integrados y se demuestra que el sistema funciona a nivel comercial o a mayor escala. • En muchos casos significa el final del desarrollo. • Todos los asuntos operativos y de fabricación han sido resueltos. • Los resultados finales son difundidos y se establece el plan para su apropiación social. • La documentación está completa y se cuenta con manuales para el uso y mantenimiento del producto.	• ¿Han sido resueltas todas las cuestiones operacionales y de fabricación? • ¿Se tiene un producto en su versión final o cuasi final? • ¿Se cuenta con un producto comercializable? • ¿Los resultados finales han sido divulgados y se ha establecido el plan para su apropiación social? • ¿Existen manuales para su uso y mantenimiento? • <u>Possible resultado:</u> prueba de desempeño que verifica y valida la funcionalidad del sistema en su configuración final.	• Productos empresariales: secretos empresariales, empresas de base tecnológica (<i>spin off</i> o <i>start-up</i>), empresas creativas y culturales, innovaciones generadas en la gestión empresarial e innovaciones en procesos y servicios. • Regulaciones, normas, reglamentos o legislaciones.
9 Sistema probado en entorno real	• El sistema se encuentra en su fase final, ha sido probado en un entorno real y es funcional en diferentes condiciones operativas. • Es un producto completamente desarrollado y disponible para su producción en serie y/o comercialización. • Se establece una estrategia de difusión de resultados, transferencia y apropiación en comunidades objetivo.	• ¿La tecnología ha sido completamente desarrollada y es funcional en diferentes condiciones operativas? • ¿La tecnología está disponible comercialmente? • ¿Cuenta con producción sostenida? • ¿Los procesos de manufactura y producción son optimizados a través de innovaciones incrementales? • ¿Cuenta con una estrategia de difusión de resultados, transferencia y apropiación en comunidades objetivo? • <u>Possible resultado:</u> informes finales (completos) del funcionamiento exitoso del sistema en condiciones reales.	• Productos empresariales: secretos empresariales, empresas de base tecnológica (<i>spin off</i> o <i>start-up</i>), empresas creativas y culturales, innovaciones generadas en la gestión empresarial e innovaciones en procesos y servicios. • Regulaciones, normas, reglamentos o legislaciones.

Figura 1. Relación entre los TRL y las etapas de la I+D+i

	TRL 1	TRL 2	TRL 3	TRL 4	TRL 5	TRL 6	TRL 7	TRL 8	TRL 9
	Principios básicos observados y reportados	Concepto y/o aplicación tecnológica formulada	Prueba de concepto experimental	Tecnología validada en condiciones controladas (laboratorio)	Tecnología validada en entorno relevante	Tecnología demostrada en entorno relevante	Demostración del prototipo de sistema en entorno real	Sistema completo y certificado	Sistema probado en entorno real
Pruebas y validación	Idea	Concepto tecnológico	Prueba de concepto	Validación de componentes en condiciones controladas (laboratorio)	Validación de componentes en entorno relevante	Demostración de sistema o subsistema en entorno relevante	Demostración de sistema en un entorno real	Certificación de sistema completo	Despliegue
Actividades de I+D+i	Investigación científica				Desarrollo tecnológico			Innovación	
Temáticas para financiar por entidad del Sistema Nacional de CTeI	Investigación básica	Formulación de la tecnología	Investigación aplicada: prueba de concepto	Desarrollo a pequeña escala (laboratorio)	Desarrollo a escala real	Sistema/ prototipo validado en entorno relevante	Sistema/ prototipo validado en entorno real	Primer sistema/ prototipo comercial	Aplicación comercial
Entorno de validación	Condiciones controladas (laboratorio)				Relevante		Real		
Relación con la cadena de innovación	Investigación		Análisis de viabilidad		Desarrollos tecnológicos y prototipos		Mercado y comercialización		
			Demostración tecnológica			Planta piloto y escalamiento			
Actividades complementarias						Divulgación científica			
				Formación de recurso humano					
						Servicios tecnológicos			
	Asesoría y consultoría								
	Apropiación social del conocimiento								

Creación propia: adaptado de Ibáñez (2021) y Minciencias (2017, 2018, 2021; ([1]).

Tabla 2. Ejemplo de la evolución del sistema TRL en el desarrollo de la tecnología de Polinización artificial por parte de Cenipalma.

TRL	Descripción
1 Principios básicos observados y reportados	La producción de aceite en racimos de cultivares híbridos OxG depende de la formación de frutos normales o fértiles (con semilla; es decir, con endospermo y embrión) y, principalmente, de partenocárpicos (sin semilla, desarrollados sin que el óvulo fuera fertilizado), ya que ambos tipos de frutos acumulan aceite en el mesocarpio. Esto implica realizar polinización asistida que, si se hace con polen, es una práctica costosa y delicada. El desarrollo de frutos partenocárpicos se puede inducir artificialmente mediante la aplicación a las flores femeninas no polinizadas de reguladores de crecimiento, principalmente del grupo de las giberelinas y las auxinas. Teniendo en cuenta que la polinización es fundamental para la formación e incremento del potencial de aceite en los racimos de los cultivares híbridos OxG, se planteó la Polinización artificial; es decir, la aplicación de reguladores de crecimiento a las inflorescencias femeninas para inducir la formación de frutos. Hito: se definió que reguladores de crecimiento tienen un efecto potencial de inducir la formación de frutos partenocárpicos en racimos de cultivares híbridos OxG.

TRL	Descripción
2 Concepto y/o aplicación tecnológica formulada	Inflorescencias femeninas de cultivares híbridos OxG fueron aisladas en estado de preantesis I o II con bolsas de poliéster que permitieron el intercambio gaseoso y mantuvieron las condiciones óptimas de temperatura y humedad para el completo desarrollo de la inflorescencia. Posteriormente, se les aplicó los reguladores de crecimiento, ácido indolacético, ácido naftalenacético (ANA), 2,4-D y etefón en concentraciones referidas como funcionales para estimular la partenocarpia en otras especies vegetales. El ácido indolacético y el etefón no estimularon una producción constante de racimos ni de frutos partenocárpicos en el híbrido OxG, mientras que la aplicación de auxinas como el 2,4-D y el ANA promovieron el desarrollo de racimos partenocárpicos de mayor tamaño y contenido de aceite. Hitos: se formuló la Polinización artificial como la aplicación de ANA a las inflorescencias femeninas para promover el desarrollo de racimos con frutos partenocárpicos aceitosos; se verificó que ANA no reporta ningún efecto colateral; se diseñó el modelo de aplicación con soluciones entre 300 y 1.200 ppm ANA en preantesis III, antesis y postantesis. Se inició la evaluación de fuentes comerciales de ANA, para lo cual se dejó como testigo la polinización con ANA grado analítico (artificial) y polen (tradicional).
3 Prueba de concepto experimental	En parcelas experimentales de dos zonas de producción palmera (Central y Oriental) se determinó que la aplicación de una solución de 1.200 ppm de ANA en al menos dos estados fenológicos (preantesis y antesis o antesis y postantesis) indujo un incremento de hasta un 15 % de frutos cosechados con mejor conformación o llenado del racimo (<i>fruit set</i> ≥ 95 %) con frutos partenocárpicos y mayores pesos del racimo con contenido de aceite, sin necesidad de realizar polinización asistida con polen. Asimismo, se establecieron las ventajas de la Polinización artificial: • Elimina la necesidad de pasar sobre la misma inflorescencia tres veces en una semana, ya que la receptividad de las flores no se limita únicamente al período de antesis. • Incrementa el área neta de cobertura semanal entre 50 % y 86 %, con un mayor rendimiento por hombre y la consecuente reducción en el costo de la labor e incremento en la probabilidad de éxito en la labor. • No altera la calidad del aceite producido en términos de composición de ácidos grasos, carotenos o vitamina E. Finalmente, se estimó que la Polinización artificial podría incrementar la tasa de extracción de aceite hasta en 5 puntos porcentuales, lo que la convierte en una tecnología prometedora, siempre y cuando se garantice una buena fertilización y suministro de agua al cultivo. Hitos: se realizaron pruebas experimentales en las zonas de producción con mayor proporción de área sembrada con cultivares híbridos OxG; se determinaron los beneficios y ventajas de la aplicación de soluciones líquidas de 1.200 ppm de ANA antes, durante o hasta 14 días después de la antesis; se exploraron modelos de predicción del beneficio potencial de la Polinización artificial, con base en el análisis fisiológico del uso de ANA.
4 Tecnología validada en condiciones controladas (laboratorio)	Se realizaron pruebas de estabilidad y formulación de la solución de ANA: la efectividad de la aplicación de más 600 ppm de ANA implicó su adecuada solubilidad, teniendo en cuenta que es un compuesto orgánico, cristalino, ligeramente amarillento, con una solubilidad limitada en agua ($0,38 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1} = 380 \text{ ppm}$ a temperatura ambiente), pero soluble en solventes orgánicos. Por ello, después de las pruebas de solubilidad y estabilidad en laboratorio (fuente de ANA asequible y accesible, agua corriente –de la llave o la disponible–, corrector de pH y dureza, y diferentes factores de solubilidad), se estableció y validó el procedimiento para preparar la solución, que puede ser conservada en oscuridad y refrigeración por cerca de 20 días, y su aplicación no se restringe a un horario determinado, sino que se puede llevar a cabo durante el día. Al tiempo se evaluó la cobertura de aplicación con diferentes volúmenes y equipos disponibles en las plantaciones, y su relación con la efectividad en términos de componentes del racimo y los frutos formados. La cobertura y efectividad obtenidas no mostraron diferencias significativas a partir de los 100 ml cuando se emplean bombas manuales de 20 litros, ya que son de fácil adquisición, funcionamiento y mantenimiento por parte de los usuarios finales. Hitos: se determinó la formulación de la solución de ANA y la forma de aplicación para obtener los resultados agrícolas y ambientales esperados; se inició el diseño del sistema óptimo para realizar la Polinización artificial.
5 Tecnología validada en entorno relevante	Teniendo en cuenta que los cultivadores implementaron la Polinización artificial con mezcla sólida de ANA + talco o ANA + polen + talco, se planteó la validación en campo de este método sólido y del método líquido (recomendado por Cenipalma), y se obtuvieron los siguientes resultados: • Con la mezcla sólida de ANA + talco se alcanzaron tasas de extracción de aceite de 25 % y hasta del 28 % con soluciones acuosas de 1.200 ppm de ANA. • La mezcla de ANA y polen no es recomendable para la polinización de los híbridos OxG, ya que el ANA generó una alteración o inhibición de la viabilidad y germinación del polen. • La mezcla de ANA y polen indujo baja formación de frutos normales y, por lo tanto, se afectó negativamente la cantidad de almendra y el cuesco de los racimos. De esta manera, la cantidad de cuesco producido no fue suficiente para superar las dificultades en el prensado por el procesamiento de la fruta producida solo con ANA. Por otro lado, se estudiaron los efectos secundarios y la residualidad del ANA en la planta (órganos diferentes a las inflorescencias), cuerpos de agua, suelo y aceite:

TRL	Descripción
5 Tecnología validada en entorno relevante	• Bajo condiciones controladas, la aplicación de ANA en diferentes estados fenológicos no generó residuos o trazas en el aceite extraído de los racimos tratados. • Al considerar las prácticas de cosecha de racimos y frutos sueltos polinizados con ANA en plantación, se encontró que no hay trazas de ANA en las muestras de suelos y aguas analizadas; sin embargo, el análisis cuantitativo en el aceite arrojó concentraciones no tóxicas y muy por debajo de los valores permitidos para ANA en diferentes cultivos. • No hay efecto de ANA sobre la diversidad microbiana edáfica a través del tiempo (0, 3 y 6 meses después de la aplicación), ya que no existe diferenciación en la comunidad bacteriana de los suelos donde se realiza Polinización artificial y suelos de bosque. • Al cabo de un año de seguimiento, el uso continuo de ANA no generó consecuencias visibles sobre las plantas. • Luego de dos años de aplicaciones continuas de elevadas concentraciones de ANA (líquida y sólida) a la corona o parte foliar (> 1.200 ppm), se presentó un cambio en el desarrollo y crecimiento de la parte aérea. Lo anterior sugiere inicialmente un posible efecto tóxico en la planta, lo que implica que la Polinización artificial se debe realizar con precaución para evitar que el producto llegue a nivel foliar. No obstante, estos monitoreos continúan y se llevarán a cabo por tiempos más prolongados, teniendo en cuenta la vida útil del cultivo y sus características perennes. De esta manera, se estableció que, si la Polinización artificial se realiza de acuerdo con las recomendaciones técnicas de Cenipalma, no se esperarían efectos adversos sobre la salud y el ambiente. Hitos: se evaluó la residualidad y los efectos secundarios o riesgos a corto plazo del uso de ANA; se estableció la toxicología y el nivel de seguridad de ANA; se determinó el riesgo potencial de la mezcla de ANA y polen, y se obtuvo información sobre la respuesta de la mezcla sólida ANA + talco.
6 Tecnología demostrada en entorno relevante	La Polinización artificial con ANA mediante suspensión líquida asperjada (recomendado por Cenipalma) y la mezcla sólida espolvoreada de ANA + talco fue validada a nivel de parcelas (escala precomercial) tanto en cultivares híbridos OxG como en <i>E. guineensis</i>. Las variables de respuesta tuvieron en cuenta la cobertura de la aplicación, la conformación o llenado del racimo (<i>fruit set</i>) y contenidos de aceite a racimo bajo apertura parcial y total de las brácteas pedunculares de la inflorescencia. Se encontró que: • Demanda tanta mano de obra como la cosecha de racimos y participa con el 19,7 % del costo de producción del cultivo. • En el cultivo de <i>E. guineensis</i> es una labor complementaria, que podría no realizarse si la polinización natural ocurre sin mayores contratiempos. • El uso de la mezcla sólida es prometedor en términos de rendimientos laborales y formación de racimos; sin embargo, el peso medio de los racimos de fruta fresca obtenido mediante el uso de ANA en mezcla líquida fue un 19,4 % mayor al obtenido con la mezcla sólida, lo que favoreció su adopción desde el punto de vista de la rentabilidad, sobre todo cuando la realiza un solo operario, ya que es menos costosa. Hitos: se demostraron las ventajas de la Polinización artificial líquida y sólida a escala precomercial, no solo para cultivares híbridos OxG sino también para cultivares de <i>E. guineensis</i> sembrados en plantaciones de las cuatro zonas palmeras; se establecieron los costos de la labor y el margen de rentabilidad de ambos métodos.
7 Demostración del prototipo de sistema en entorno real	El escalamiento de la Polinización artificial se llevó a cabo con plantaciones de todas las zonas palmeras con los cultivares más comunes de híbridos OxG, mediante estudios de tiempos y movimientos, indicadores de productividad laboral, implementación del punto óptimo de cosecha y análisis de costo-beneficio. Los resultados señalan que: • A un trabajador de Polinización artificial se le pueden pedir entre 188 y 249 inflorescencias por día de trabajo, dependiendo de la densidad de inflorescencias por hectárea. • Al implementar criterios sobre el punto óptimo de cosecha, la tasa de extracción de aceite aumentó del 6 al 29,7 %. • La Polinización artificial es más costosa que usar solo polen de <i>E. guineensis</i>, pero el aumento en la productividad de racimos y el aumento en la cantidad de aceite extraído compensan este costo extra y brindan mayor rentabilidad a los productores. En definitiva, se demostró que la Polinización artificial como complemento de la implementación del punto óptimo de cosecha permite intensificar sosteniblemente el cultivo, con mayores rendimientos y un negocio más resiliente. Por ello, se estableció el protocolo de la aplicación segura de ANA, para lo cual el personal de recepción, inspección, verificación y distribución del producto deben usar elementos de protección personal, como casco, mascarilla, guantes y botas de caucho. Hito: se realizó la validación de la eficacia de la Polinización artificial a una escala comercial.

TRL	Descripción
8 Sistema completo y certificado	Tecnopalma - Bioinsumos incluyó en su oferta tecnológica el Polinizador Artificial 98 %, un producto cuyo ingrediente activo es ANA al 98 %, primer producto registrado ante el ICA de ácido naftalenacético para el cultivo de palma de aceite (Registro ICA No. 2686). Al tiempo, el Polinizador Artificial 98 % se consideró un 'plaguicida químico de uso agrícola' por la Decisión 767 de 2011, pese a ser un regulador de crecimiento en plantas, lo que implicaría que su uso indiscriminado y en dosis no controladas genera los mismos efectos que se obtienen con la aplicación de un herbicida. Por lo anterior, el Instituto Nacional de Salud otorgó, bajo Resolución 1913 de 2019, el dictamen técnico toxicológico al Polinizador Artificial 98 %, en el que se clasifica en la categoría III como ligeramente peligroso, y se establecen los peligros para la salud y el ambiente, así como las indicaciones de almacenamiento y manipulación con todos los elementos de protección personal. Esto se complementó con la definición de la Ficha de Datos de Seguridad del Polinizador Artificial 98 % en el marco del Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Productos Químicos. Con estas normativas se aseguró la eficacia agronómica y se demostró la calidad y la seguridad del Polinizador Artificial 98 %. De esta manera, se llevaron a cabo pruebas controladas y no controladas con el Polinizador Artificial 98 % en plantaciones y campos experimentales de Cenipalma, en las cuales se establecieron las siguientes recomendaciones: • Las aplicaciones pueden ser en polvo o líquido (según la preferencia); sin embargo, se debe tener en cuenta que la dosis y la mezcla varía entre ellos. • Cada inflorescencia debe recibir al menos tres aplicaciones, así: 1) estadio fenológico 607 de antesis, 2) estadio fenológico 609, y 3) estadio fenológico 703. • Se debe asegurar la homogeneidad de la mezcla con el Polinizador Artificial 98 %, y, preferiblemente, preparar la mezcla el mismo día que se va a realizar la aplicación. • El equipo de aplicación debe poseer y mantener la presión que asegure el cubrimiento total de la inflorescencia, y dispensar la cantidad justa del producto en cada aplicación. • No se debe mezclar el Polinizador Artificial 98 % con polen, ya que este último pierde su viabilidad. • El Polinizador Artificial 98 % se debe mantener almacenado a una temperatura inferior a 20 °C. Hitos: se llevaron a cabo estudios de efectividad, toxicidad y seguridad del Polinizador Artificial 98 %; se evaluó el riesgo-beneficio asociado a su uso en condiciones controladas y no controladas en plantaciones; se obtuvieron las certificaciones requeridas para la comercialización del Polinizador Artificial 98 %.
9 Sistema probado en entorno real	La evaluación en campo del Polinizador Artificial 98 % bajo condiciones comerciales permitió establecer que su aplicación no solo indujo la formación de frutos partenocárpicos aceitosos, sino también un incremento de la producción de aceite a niveles nunca vistos (con producciones incluso superiores a 10 t aceite/ha/año), tanto en cultivares de <i>E. guineensis</i> como en híbridos OxG, por lo que su uso se convirtió en un estándar del manejo agronómico de estos últimos. Adicionalmente, se determinaron los siguientes beneficios: • Incrementa un 15 % los frutos cosechados en las plantaciones para una mejor conformación de racimos y disminución de malogros, gracias a que genera mayor receptividad en las flores. • Aumenta en promedio la extracción de aceite entre un 23 y 26 %, y se han encontrado extracciones hasta de 31 %, debido al aumento en la formación de frutos partenocárpicos. • Disminuye la frecuencia de entrada de los polinizadores al lote cada semana, ya que permite aplicaciones en postantesis. • Mejora la relación costo-beneficio, ya que se garantiza un mayor número de inflorescencias polinizadas al día. El Polinizador Artificial 98 % está disponible para las cuatro zonas de producción, tiene un costo de \$ 195.000 / Kg + el valor del flete con posibilidad de realizar despachos a nivel nacional, y por ello se ha implementado en la totalidad del área productiva de cultivares híbridos OxG. Hitos: se completaron las pruebas de campo de la Polinización artificial en condiciones operativas; el Polinizador Artificial 98 % ha sido aprobado y está disponible para su comercialización en el territorio nacional; la tecnología de Polinización artificial ha sido implementada en las cuatro zonas palmeras y es un referente de manejo agronómico para cultivares híbridos OxG.

2. Conclusiones

El empleo de los TRL constituye una oportunidad para que la oferta tecnológica de Cenipalma al sector palmero (recomendaciones, protocolos, metodologías; servicios de laboratorio; sistemas de información; material de siembra; equipos, instrumentos, herramientas; servicios tecnológicos, bioproductos, entre otros) sea más precisa en el corto, mediano y largo plazo, ya que permite definir el nivel de madurez tecnológica al que se compromete determinado proyecto. Apoyar un proyecto en el que se abordarían los 9 TRL significaría fomentar el desarrollo de una nueva tecnología desde su idea hasta su despliegue en el mercado. Si el foco es la investigación, los proyectos se deberían referir fundamentalmente a los tres primeros niveles (TRL 1 - TRL 3), mientras que, si se abordan fundamentalmente actividades de desarrollo tecnológico, el proyecto se debe centrar más en los cuatro siguientes (TRL 4 - TRL 7). Finalmente, los proyectos de innovación más cercanos al mercado y los proyectos de implementación y despliegue se contemplarían en los dos últimos (TRL 8 - TRL 9). De esta manera, las direcciones misionales de Cenipalma ratificarían su acción a la luz de los TRL: la Dirección de Investigación soportaría las actividades de investigación científica (TRL 1 - TRL 4) y desarrollo tecnológico (TRL 5 - TRL 7), la Dirección de Extensión se encargaría desde el desarrollo tecnológico hasta la innovación (TRL 6 - TRL 9), y la Gerencia de Innovación y Desarrollo lideraría las acciones de certificación y despliegue (TRL 8 - TRL 9).

Por lo tanto, la identificación del TRL en los proyectos le permitirá a Cenipalma:

- Aprobar la realización de un nuevo proyecto antes de su inicio o definir el plan de inversión de una segunda fase, a partir de un punto de partida cierto (alguno de los TRL). De acuerdo con Ibáñez (2021), tal definición de TRL se puede realizar desde dos enfoques: (i) *TRL's bottom-up approach*: el solicitante del proyecto indica el TRL de partida y el TRL final al que se debe llegar una vez termine el proyecto; (ii) *TRL's top-down approach*: el solicitante o planificador establece, en general o para cada temática, los TRL que se deberían abordar y realiza las actividades dentro del rango

indicado (dependiendo del estado inicial) hasta alcanzar el TRL objetivo.

- Decidir sobre la pertinencia de llevar una tecnología a un nivel más avanzado de desarrollo, con el fin de lograr, por ejemplo, un licenciamiento, una patente o un producto comercializable por Tecnopalma.
- Contar con una evaluación prospectiva de la(s) tecnología(s) que conlleve a afinar los resultados esperados de un proyecto, en coherencia con las actividades que se van a desarrollar en un plazo y presupuesto precisos y las demandas u oportunidades del sector palmero colombiano.
- Incrementar las oportunidades de financiación de las convocatorias de Minciencias, el Sistema General de Regalías u otra entidad que haga uso de los TRL como un referente para identificar la correspondencia del alcance de las actividades de I+D+i con los beneficios científicos, sociales, ambientales o económicos del país.

Finalmente, es importante identificar si los proyectos de Cenipalma abordarán la realización de productos nuevos o mejorados y se desarrollarán a partir de tecnologías con alto o bajo nivel de madurez o disponibilidad. En este caso, para identificar el carácter innovador de un proyecto de CTel es importante tener en cuenta no solo el nivel de madurez de la tecnología que efectivamente se desarrollará como consecuencia de este, sino también las tecnologías que se utilizarán o que directamente se incorporarán durante el ciclo de vida del proyecto. Lo anterior porque existe una correlación entre las tecnologías que se usan durante el ciclo de vida del proyecto y el propio desarrollo tecnológico que se realiza durante la ejecución de este (Fierro *et al.*, 2021). En general, cuanto más inmaduras sean las tecnologías que se utilizan, más riesgo se afrontará y más desarrollo tecnológico propio se requerirá para alcanzar los objetivos planteados, por lo que el riesgo del proyecto será mayor y, en consecuencia, también será mayor su carácter innovador (Ibáñez, 2021). Por lo tanto, conocer el punto de inicio y el punto de finalización en términos de TRL de un determinado proyecto significa mayor conocimiento del alcance del proyecto susceptible de financiación.

Referencias bibliográficas

- Bedoya, G., & Gómez, I. (2021). Guía para la identificación del grado de madurez (TRL). Procedimientos MCDIIFMiGU001 del Centro de Desarrollo e Innovación de la Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia - sede Medellín. <https://minas.medellin.unal.edu.co/>
- Fierro, O., Martínez, J., & Domínguez, I. (2021). Madurez tecnológica e innovación en empresas mexicanas. *Investigación administrativa*, 50(128). <https://doi.org/10.35426/iaav50n128.09>
- Ibáñez, J.M. (2021). Niveles de Madurez de la Tecnología - Technology Readiness Level (TRLs) - Una introducción. Notas del Ministerio de Industria, Comercio y Turismo de España. <https://www.mincotur.gob.es/es-es/Paginas/index.aspx>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2017). Anexo 13. Technology Readiness Levels (TRL) - Descripción. 2ª Convocatoria ecosistema científico para la financiación de Programas de ID+i que contribuyan al mejoramiento de la calidad de las instituciones de educación superior colombianas 2017. <https://minciencias.gov.co/>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2018). Anexo 1. Technology Readiness Levels – TRL. Convocatoria Cierre de Brechas Tecnológicas 2018. <https://minciencias.gov.co/>
- Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación. (2021). Tipología de proyectos calificados como de carácter científico, tecnológico e innovación - versión 6.0. <https://minciencias.gov.co/>
- [1]: Technology Readiness Level. https://www.nasa.gov/pdf/458490main_TRL_Definitions.pdf. https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level.