

PROYECTO FIA-UACH PYT 2009-0080

**MANUAL DE FERTILIZACION DE
ARANDANOS CULTIVADOS EN EL
SUR DE CHILE**

Dante Pinochet Tejos
Ing. Agr., M.Sc., Ph.D.

Universidad Austral
de Chile

Pamela Artacho Vargas
Ing. Agr., M.Sc., Dra.(c)

Pontificia Universidad
Católica de Chile

Alex Maraboli Sandoval
Ing. Agr., M.Sc.(c)

Universidad Austral
de Chile

Valdivia-Chile
2014

Este Manual fue editado por la Universidad Austral de Chile como parte de las actividades comprometidas en el Proyecto FIA PYT 2009-0080 “Servicio de diagnóstico y control de la fertilización de arándanos cultivados en suelos volcánicos del Sur de Chile”, 2009-2013.

Permitida su reproducción total o parcial citando la fuente y los autores.

Cantidad de ejemplares: 1.000 unidades

Impresión: Imprenta América

Valdivia, Chile, 2014

INDICE DE CONTENIDOS

	Página
1. ASPECTOS GENERALES DEL CULTIVO DEL ARANDANO	1
1.1 Introducción	1
1.2 Descripción botánica	2
1.3 Ciclo de crecimiento y desarrollo	4
Literatura consultada	7
2. EL CULTIVO DEL ARANDANO EN EL SUR DE CHILE	8
2.1 Antecedentes generales	8
2.2 Marco edafoclimático del sistema productivo	10
2.3 Componentes del rendimiento en arándano	12
2.4 Rendimientos alcanzables en arándano en el sur de Chile	13
Literatura consultada	17
3. MODELO DE INTERVENCION DE LA FERTILIZACION DEL HUERTO FRUTAL	19
3.1 Marco conceptual	19
3.2 Uso del análisis de suelo para evaluar el suministro de nutrientes del suelo	20
3.2.1 Niveles críticos de nutrientes para arándanos cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile	22
3.3 Diseño de la estrategia de fertilización para nutrientes distintos a Nitrógeno	26
3.3.1 Fertilización de corrección	27
3.3.2 Fertilización de mantención	29
3.4 Control de la fertilización mediante el uso del análisis foliar	36
3.4.1 Estándares nutricionales y fechas de muestreo foliar para arándanos cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile	38
3.5 Ejemplos de cálculo de las dosis de fertilización	42
3.5.1 Interpretación del análisis de suelo	42
3.5.2 Ejemplos de cálculo de la dosis de corrección	43
3.5.3 Ejemplos de cálculo de la dosis de mantención	44
Literatura consultada	47

4. FERTILIZACION NITROGENADA: UN CASO ESPECIAL	48
4.1 Antecedentes generales	48
4.2 Demanda de Nitrógeno del arándano	49
4.3 Suministro de Nitrógeno del suelo	50
4.4 Eficiencia de la fertilización nitrogenada	54
4.5 Ejemplo de cálculo de la dosis de fertilización nitrogenada	56
Literatura consultada	58
5. ACIDEZ DEL SUELO Y TOXICIDAD POR ALUMINIO	59
5.1 Antecedentes generales	59
5.2 Acidez del suelo y disponibilidad de Aluminio para las plantas	60
5.3 Nivel crítico en el suelo y estándar foliar de Aluminio para arándanos cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile	62
5.4 Corrección de la acidez del suelo y toxicidad por Aluminio	64
Literatura consultada	66

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Descripción	Página
2.1	Características climáticas de los principales agroclimas del sur de Chile.	10
3.1	Niveles críticos en suelos volcánicos para el cultivo del arándano en el sur de Chile.	26
3.2	Factores de eficiencia de fertilización para suelos volcánicos con contenidos de Al extractable (Al Ext) mayores a 150 mg kg^{-1} y para fertilizaciones de corrección aplicadas en cobertera y en una única dosis.	28
3.3	Factores de demanda para macronutrientes en arándanos cv. 'Elliot' y 'Brigitta' cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.	31
3.4	Factores de demanda para micronutrientes en arándanos cv. 'Elliot' y 'Brigitta' cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.	32
3.5	Factores de extracción de macronutrientes en la fruta cosechada de arándanos cv. 'Elliot' y 'Brigitta' cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.	33
3.6	Factores de extracción de micronutrientes en la fruta cosechada de arándanos cv. 'Elliot' y 'Brigitta' cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.	33
3.7	Peso seco de residuos de poda de arándanos cv. 'Elliot' y 'Brigitta' cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.	34
3.8	Factores de extracción de nutrientes en los residuos de poda de arándanos cv. 'Elliot' y 'Brigitta' cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.	35
3.9	Dosis de mantención de P, K, Ca y Mg para diferentes niveles de productividad, sin retiro de residuos de poda y considerando una densidad de $3.333 \text{ plantas ha}^{-1}$.	35
3.10	Dosis de mantención de P, K, Ca y Mg para diferentes niveles de productividad, considerando el retiro total de los residuos de poda y una densidad de $3.333 \text{ plantas ha}^{-1}$.	36
3.11	Estándares foliares y fechas de muestreo recomendadas para el cultivo del arándano en agroecosistemas del sur de Chile.	41
3.12	Análisis de suelo del Laboratorio de Suelos de la UACH.	42
4.1	Estimación del factor de suministro de N desde el N "potencialmente mineralizable" para el cultivo del arándano en suelos volcánicos del sur de Chile, de acuerdo a la cantidad de residuos orgánicos ingresados en los últimos 6 años.	53
4.2	Eficiencia de la fertilización N para huertos de arándanos en el sur de Chile, de acuerdo al nivel tecnológico para el control de las pérdidas de N del fertilizante.	55

INDICE DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
1.1	Planta dormante de arándano alto de 4 años de edad (A) y ramilla con yemas simples florales y vegetativas (B).	2
1.2	Crecimiento de brotes y raíces en arándanos durante los diferentes estados fenológicos del cultivo.	3
1.3	Estados de desarrollo de la yema floral (A, yema cerrada; B, yema hinchada; C, quiebre de yema; D, racimo apretado); de la yema vegetativa (E, punta verde temprana; F, punta verde tardía; G, brotes en expansión), de la flor (H, botón rosado temprano; I, botón rosado tardío; J, inicio floración; K, plena floración; L, caída de pétalos); y, del fruto (M, fruto verde; N; pinta; O, 25% cobertura azul; P, 75% cobertura azul; Q; inducción yemas para siguiente temporada).	6
2.1	Superficie cultivada y producción de arándanos en Chile en los últimos 12 años.	9
2.2	Diagrama referencial de la ocurrencia de los diferentes estados fenológicos del arándano en la zona sur de Chile.	9
2.3	Mapa de distribución de suelos derivados de materiales volcánicos en el sur de Chile.	11
2.4	Curva de producción de un huerto de arándano en el sur de Chile, con rendimientos potenciales altos y una densidad de plantación de 3.333 plantas ha ⁻¹ .	14
2.5	Relación entre el rendimiento real medido a la cosecha y el rendimiento predicho mediante la metodología de conteo de yemas reproductivas.	16
3.1	Esquema del modelo de intervención de un huerto frutal para la resolución de un problema nutricional.	19
3.2	Relación entre el nivel de disponibilidad de un nutriente en el suelo y el rendimiento de un cultivo o frutal en términos relativos.	21
3.3	Esquema de muestreo de suelo en la hilera de plantación para un punto de muestreo.	23
3.4	Relación entre el nivel de disponibilidad de P y K en el suelo y el rendimiento relativo de arándanos cultivados en el sur de Chile durante las temporadas 2009-10 y 2010-11.	24
3.5	Relación entre la disponibilidad de N-mineral medida a 0-20 cm y a 0-40 cm de profundidad de suelo durante la temporada 2010-11.	25
3.6	Relación entre la disponibilidad de N-mineral en el suelo medida a 0-40 cm de profundidad a principios de temporada y el rendimiento relativo de arándanos cultivados en cinco huertos del sur de Chile. Temporadas 2009-10 y 2010-11.	25
3.7	Aplicación de fertilizantes y enmiendas en cobertera en un huerto de arándano.	28

Figura	Descripción	Página
3.8	Acumulación de biomasa en plantas de arándano cv. 'Brigitta' y 'Elliot' cultivadas en el sur de Chile durante la temporada 2010-11.	32
3.9	Pesaje de los residuos de poda para la estimación de la dosis de mantención en huertos de arándano.	34
3.10	Relación general entre la concentración de un nutriente en los tejidos vegetales y el rendimiento en términos relativos del cultivo o frutal.	37
3.11	Variación de la concentración foliar (%) de macronutrientes primarios (N, P y K) en muestras foliares de arándanos cultivados en el sur de Chile durante las temporadas 2009-10 y 2010-11.	39
3.12	Variación de la concentración foliar (%) de macronutrientes secundarios (Ca, Mg y S) en muestras foliares de arándanos cultivados en el sur de Chile durante las temporadas 2009-10 y 2010-11.	40
3.13	Detalle del proceso de muestreo foliar.	41
4.1	Relación entre la fruta producida y la absorción de N en el crecimiento aéreo anual de plantas de arándano cv. 'Brigitta' y 'Elliot', creciendo en agroecosistemas de la zona sur de Chile.	49
4.2	Evolución temporal de N-mineral a 0-40 cm de profundidad en suelos volcánicos cultivados con arándanos, durante el período comprendido entre brotación y caída de hojas. Temporada 2010-2011.	51
4.3	Parcialización de la fertilización N de acuerdo a las etapas fenológicas de huertos de arándano del sur de Chile. (A) Primera aplicación de N; (B) segunda aplicación de N; y (C) tercera aplicación de N.	55
5.1	Actividad relativa de las formas químicas de Al según el pH de la solución.	61
5.2	Relación entre el pH y la disponibilidad Al en suelos volcánicos del sur de Chile cultivados con arándano alto (regiones de los Ríos y los Lagos).	61
5.3	Relación entre la disponibilidad de Al en el suelo y el rendimiento relativo de arándanos cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile durante las temporadas 2009-10 y 2010-11.	63
5.4	Variación de la concentración foliar (%) de Al en muestras foliares de arándanos cultivados en el sur de Chile durante las temporadas 2009-10 y 2010-11.	63

PROLOGO

Hasta antes de la publicación de este manual, los productores de arándano del sur de Chile solo contaban con tecnologías de producción y diagnóstico nutricional generadas principalmente en Estados Unidos. Estas tecnologías habían demostrado ser adecuadas para las condiciones productivas de la zona central y centro-norte, pero no para la zona sur del país. Las causas eran múltiples: el uso de estándares nutricionales para análisis de suelo y foliar no validados para las condiciones productivas del sur de Chile; la excesiva acidificación del suelo debido a la aplicación de azufre elemental pre-plantación y al uso intensivo de fertilizantes amoniacales y urea, que induce un aumento de la disponibilidad de Aluminio con el consiguiente riesgo de toxicidad en las plantas; el uso del sistema de riego como vía exclusiva de aplicación de nutrientes, dificultando la fertilización nitrogenada a inicios de temporada con plantas con una baja demanda hídrica; el uso generalizado de aserrín de pino como “mulch” y enmienda y su desconocido efecto sobre el suministro de Nitrógeno del suelo; entre otras. Todo lo anterior se resumía en la aplicación de tecnologías de cultivo foráneas sin validación para las condiciones locales de producción, lo que era inadecuado bajo las particulares condiciones edafoclimáticas de la zona sur.

La presencia dominante de suelos volcánicos en la zona sur de Chile, caracterizados por un alto contenido de materia orgánica y aluminio activo, una elevada porosidad, baja densidad aparente, pH moderadamente ácido a ácido y una elevada capacidad de retención de fosfatos; determinaban que las prácticas culturales más comunes en plantaciones comerciales de arándano en el resto de Chile y Norteamérica, no fueran pertinentes ni técnica ni económicamente para el manejo de los huertos. Se agregaba la falta de información científica, generada localmente, en relación a la demanda de nutrientes del cultivo, al suministro de nutrientes y a la eficiencia de fertilización en suelos volcánicos, impidiendo una estimación racional de la fertilización. En este contexto, un equipo del Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos de la Universidad Austral de Chile elaboró y desarrolló el Proyecto FIA PYT 2009-0080 “Servicio de diagnóstico y control de la fertilización en arándanos cultivados en suelos volcánicos del Sur de Chile”, en conjunto con un grupo de destacados productores de arándano de la zona y con el apoyo financiero de la Fundación para La Innovación Agraria (FIA), de la Universidad Austral de Chile y de los propios productores.

Una característica particular del Proyecto FIA PYT 2009-0080 fue la ejecución de sus estudios y ensayos en huertos comerciales de arándano, bajo condiciones de campo. Esto representó un gran desafío tanto para el equipo técnico como para los productores, quienes se transformaron en parte fundamental del equipo de investigación. Este gran esfuerzo e inversión de tiempo, recursos humanos e insumos por parte de los huertos asociados al proyecto, constituyó un invaluable aporte para el proyecto, lo que es agradecido por los autores:

- Agrícola Río Cruces Ltda.
- Berries Osorno Chile S.A. (BOCSA)
- Sociedad Agrícola Río Chepu Ltda.
- Agrícola Cox Ltda.
- Agrotrigo S.A.
- Agrícola Ñancul S.A.
- Sociedad Agrícola Las Tiacas S.A.
- Agrícola y Ganadera El Pilar Ltda.
- Cooperativa Campesina Apícola Valdivia Ltda. (Apicoop)
- Sociedad Agrícola A y G Berries Ltda.
- Sucesión Agrícola Luis Alessandrini Grez Ltda.
- Berries Colhue S.A.

Los autores agradecen también a: los asesores del Proyecto, Dr. Juan Nissen (Universidad Austral de Chile), Dr. Fernando Medel (Universidad Austral de Chile) y Dr. Juan Pablo Zoffoli (Pontificia Universidad Católica de Chile); el profesional de apoyo, Ing. Agr. Miguel Ángel Toro, por su trabajo en terreno y su compromiso; el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad Austral de Chile y su personal, que realizó los análisis químicos de suelo y tejidos vegetales asociados a la ejecución de esta iniciativa; los alumnos tesis de la carrera de Agronomía de la Universidad Austral de Chile que colaboraron en las distintas etapas de este proyecto; y a la Empresa Exportadora Driscoll's por su apoyo desinteresado en materiales de embalaje de fruta.

Una mención especial merece el Profesor Roberto MacDonald (Q.E.P.D.), quien fue parte del equipo técnico y estuvo involucrado en este Proyecto desde su génesis, pero no alcanzó a disfrutar de los resultados finales. Su dedicación y rigurosidad, aún en los momentos más difíciles, constituyen un ejemplo para los que tuvimos la posibilidad de trabajar con él.

La publicación de este libro propone un modelo de intervención de la fertilización en los huertos de arándano del sur de Chile y resume los principales resultados provenientes de cuatro temporadas de investigación. Las primeras dos temporadas entregaron la información comprometida por el proyecto, la que fue validada en las subsiguientes dos temporadas de cultivo. Se establecieron los niveles críticos en el suelo para macronutrientes primarios y secundarios en agroecosistemas del sur de Chile, que permitirá a los productores contar con criterios de decisión para las fertilizaciones de corrección y mantención en los huertos. Lo anterior, junto con la determinación de las demandas nutricionales del cultivo en sus distintas etapas productivas, permitirá estimar con precisión las dosis de fertilización de mantención y evitar la sobreestimación de las dosis y, por lo tanto, un aumento innecesario en los costos de producción. También se ajustaron los estándares nutricionales para análisis foliar y las correspondientes fechas de muestreo para las condiciones de producción del sur del país, lo que permitirá contar con un indicador del estado nutricional de las plantas y una herramienta confiable de control y ajuste de las estrategias de fertilización.

Finalmente, se establecieron los niveles críticos en el suelo y en la planta de elemento tóxico Aluminio, los que permitirán definir el manejo de la acidez del suelo.

Se espera que este modelo de intervención de la fertilización sea ampliamente utilizado por los ingenieros y técnicos que trabajan en el manejo y fertilización de huertos de arándano en el sur de Chile y que ellos nos retroalimenten con la experiencia de su aplicación. Además, dado que la institución generadora de este modelo es una universidad dedicada a la investigación y docencia, por cierto que todo el conocimiento desarrollado será traspasado a los futuros ingenieros agrónomos que están siendo formados en la Escuela de Agronomía de la Universidad Austral de Chile.

El término del Proyecto FIA PYT 2009-0080, ciertamente que no agota el tópico de investigación en fertilización y nutrición de arándanos. El modelo de intervención propuesto debe ser afinado y/o corregido en el futuro, en la medida que las recomendaciones de este manual no produzcan el impacto esperado. Después de un tiempo de evaluación, a través del sistema de control en el suelo y en las plantas, se espera que la retroalimentación produzca mejoras en el modelo original. Además, existen áreas de estudio que no pudieron ser abordadas en este proyecto y que son de alto interés para los productores, tales como aspectos relacionados al riego, a la fertilización foliar, al manejo de suelo, a la poda, entre otras. El cierre de este proyecto abre múltiples líneas de investigación que deben ser abordadas en colaboración con actores privados y públicos, asegurando de esta manera su valoración y pertinencia.

Valdivia, Marzo de 2014

CAPITULO 1

ASPECTOS GENERALES DEL CULTIVO DEL ARANDANO

1.1 Introducción

El arándano es un arbusto frutal nativo del hemisferio Norte, considerado dentro del grupo de los “berries”. Las especies cultivadas más importantes pertenecen al género *Vaccinium* e incluyen *V. corymbosum* L. (arándanos de arbusto alto), *V. ashei* Reade (arándano ojo de conejo) y *V. angustifolium* (arándanos de arbusto bajo).

La principal especie cultivada a nivel mundial es *Vaccinium corymbosum* L., la que se encuentra dividida en cultivares del norte o del sur, según sus requerimientos de frío y dureza frente al frío invernal. Los cultivares de arándano alto del norte poseen elevados requerimientos de frío (800-1000 horas frío <7°C) y soportan temperaturas invernales tan bajas como -20°C. En este grupo destacan los cultivares ‘Elliot’, ‘Brigitta’, ‘Jersey’, ‘Bluecrop’, ‘Duke’, ‘Aurora’ y ‘Liberty’, entre otros. Los cultivares de arándano alto del sur no toleran temperaturas invernales muy por debajo de 0°C y sus requerimientos de frío no superan 550 horas. Los cultivares más populares dentro de este grupo son: ‘O’Neal’, ‘Misty’, ‘Star’, ‘Legacy’, ‘Jewel’, ‘Ozarkblue’ y ‘Emerald’, entre otros.

Los arándanos de arbusto alto son cultivados en un rango amplio de climas. Sin embargo, los sitios de cultivo están definidos mayormente por los requerimientos de frío y dureza frente al frío invernal de los distintos cultivares. Además, todos los tipos de arándano requieren suelos ácidos, bien drenados y con amplia disponibilidad de agua. Las variedades de arándano alto del Norte son cultivadas predominantemente en Australia, Francia, Alemania, Italia, Nueva Zelanda, USA, Polonia y Chile. Mientras que los arándanos altos del Sur son cultivados principalmente en Australia, Argentina, USA, Chile y el sur de España.

En la actualidad, la superficie mundial cultivada con arándanos de arbusto alto es cercana a 85.000 hectáreas con una producción mayor a 380.000 toneladas, volumen mayormente transado en los mercados internacionales. El 45% de la superficie y el 55% de la producción mundial son aportadas por USA, quien es el principal productor y consumidor de esta fruta, debiendo complementar su demanda doméstica con altas importaciones. En tanto, Chile registra la mayor superficie en Sudamérica y la segunda a nivel mundial, con 14.800 hectáreas aproximadamente y una producción cercana a 95.000 toneladas en el año 2012.

Chile, como segundo productor mundial, orienta casi la totalidad de su producción a mercados externos, lo que lo ha situado como el segundo exportador de arándanos frescos a nivel mundial (con cerca de 70.000 toneladas anuales), siendo superado solo por Canadá. El 75% de las exportaciones chilenas de arándano fresco es comercializada en USA, aunque con una creciente participación de los mercados europeo y asiático. Por su parte, las exportaciones chilenas de arándanos congelados han crecido de manera notoria durante la última década, a lo que se agrega un interesante crecimiento de las exportaciones de jugos y deshidratados durante los últimos años. Todo lo anterior, se suma a la creciente demanda mundial de esta fruta y a la inexistencia de competencia relevante de abastecedores de arándano en contraestación, lo que ha configurado una situación ventajosa para la industria nacional.

1.2 Descripción botánica

El arándano es un arbusto leñoso de hoja caduca o perenne, cuya estatura es la principal diferencia entre las especies cultivadas. Las variedades del grupo de arándano alto miden entre 1,8 a 4,0 metros, a diferencia de los arándanos bajos que miden entre 0,10 a 0,15 metros y los arándanos “ojo de conejo” que pueden crecer hasta 6,0 metros de alto.

El arbusto de arándano está compuesto de brotes que emergen desde las yemas vegetativas formadas en la temporada anterior o desde las yemas dormantes ubicadas en la corona. Los brotes emergidos desde la base de la planta se denominan cañas y se vuelven leñosos en su segunda temporada de crecimiento. Las yemas florales se forman en los nudos superiores de los brotes del año, por lo que en un tallo dormante de 1 año de edad, se pueden diferenciar por su posición en el tercio superior de la caña, su forma globosa y mayor tamaño que las yemas vegetativas (Fig. 1.1).

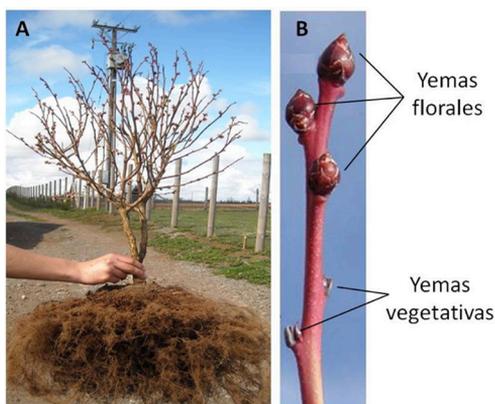


Figura 1.1. Planta dormante de arándano alto de 4 años de edad (A) y ramilla con yemas simples florales y vegetativas (B).

El arbusto posee hojas alternas, cortamente pediceladas, enteras o aserradas y con formas variadas. Las flores que están dispuestas en racimos, presentan una corola fusionada de color blanco a rosado y un ovario ínfero con 4 a 5 lóculos, cada uno con muchos óvulos en su interior.

El fruto es una baya con muchas semillas y madura 2 a 3 meses después de la polinización de las flores, dependiendo del cultivar y de las condiciones ambientales. Las bayas varían en su color desde azul claro a negro, están cubiertas por una cutícula cerosa ("bloom") y, generalmente, presentan un interior blanco. El crecimiento del fruto se describe por una curva doble sigmoidea, con tres estados de desarrollo. El estado I se caracteriza por una división celular y ganancia de peso acelerados. En el estado II, el crecimiento del fruto es muy bajo, pero el desarrollo de la semilla es activo. El estado III se caracteriza por un crecimiento muy rápido del fruto a través de la elongación de las células. En total, el período de desarrollo del fruto varía entre 42 a 90 días para cultivares de arándano alto del norte y entre 55 y 60 días para los cultivares del sur. El fruto posee variadas propiedades benéficas para la salud, tales como una elevada presencia de antioxidantes, alta cantidad de vitaminas y bajo aporte calórico.

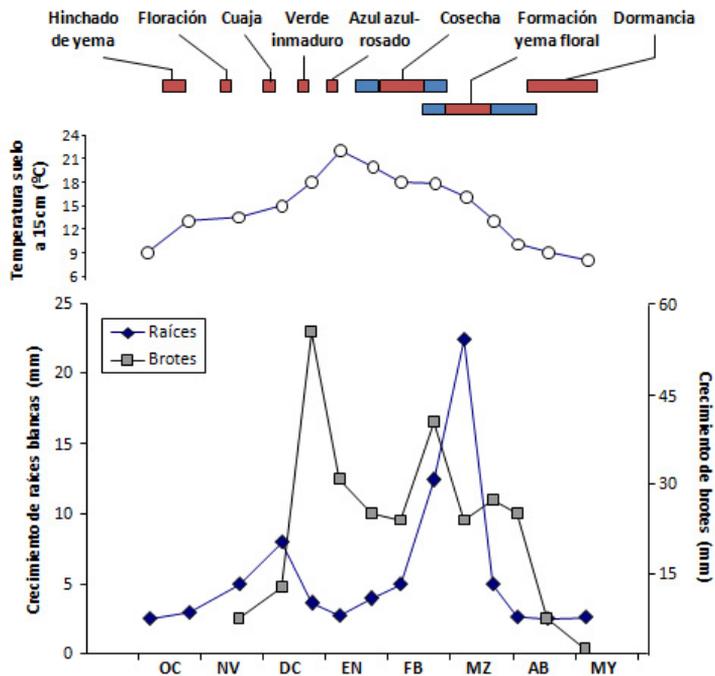


Figura 1.2. Crecimiento de brotes y raíces en arándanos durante los diferentes estados fenológicos del cultivo.

Fuente: Adaptado de Bryla (2006)

Las plantas de arándano alto poseen dos tipos de raíces: raíces gruesas (hasta 11 mm) para almacenamiento y anclaje; y, raíces finas (tan pequeñas como 1 mm) que cumplen la función de absorción de agua y nutrientes. El sistema radicular es superficial, fibroso y carece de pelos radicales, aunque es colonizado por hongos micorrízicos. El crecimiento radical ha sido descrito como bimodal, con un primer “peak” de crecimiento en primavera entre el estado de cuaja y fruto verde. El segundo “peak” es de mayor magnitud y ocurre después de la cosecha de los frutos (Fig. 1.2). En general, cerca del 50% de las raíces se encuentran dentro de una distancia de 30 cm desde la corona y entre el 80-85% de las raíces están dentro de los primeros 60 cm de suelo. El uso de “mulch” tiende a concentrar las raíces cerca de la superficie.

1.3 Ciclo de crecimiento y desarrollo

El arbusto presenta un ciclo anual de crecimiento en el que se alternan un período de dormancia en otoño-invierno y un período de crecimiento activo en primavera-verano. En la medida que el fotoperiodo y las temperaturas disminuyen en el otoño, los arbustos entran en dormancia. Subsecuentemente, requieren de una cierta acumulación de horas frío durante el invierno para reasumir un crecimiento normal durante la siguiente primavera. Los órganos permanentes, como las raíces, coronas y tallos de diferentes edades, están presentes en la planta durante todo el año. Mientras que los órganos transitorios, como brotes, hojas, flores y frutos, están presentes sólo durante el período de crecimiento activo.

Los brotes emergen en primavera, principalmente desde yemas vegetativas simples formadas en la temporada anterior, aunque también pueden originarse desde yemas dormantes ubicadas cerca de la base de las cañas de mayor edad (por ejemplo, luego de una poda intensa). La brotación de las yemas vegetativas ocurre 1-2 semanas previo a la floración, aunque su desarrollo procede a una tasa más lenta que la de las yemas florales. El crecimiento de los brotes que se extiende hasta mediados del verano, es caracterizado por ser simpodial (en zig-zag o irregular) y episódico, siendo acompañado de un número variable de abortos apicales. Cada aborto apical, denominado “punta negra”, finaliza un período o flujo de crecimiento de un brote individual, el que puede presentar uno o más flujos, dependiendo de la variedad, el vigor del brote y las condiciones ambientales.

Generalmente, los brotes no son ramificados durante el primer año. Sin embargo, después de la floración en el segundo año, dos o más yemas vegetativas ubicadas bajo las inflorescencias brotan y comienzan a crecer, resultando en un tallo ramificado. En los años posteriores, múltiples yemas vegetativas brotarán después de la floración, por lo que el tallo se irá ramificando cada vez más. También se ha observado brotación de yemas axilares de los brotes del año en variedades de arándano alto del sur, generando los llamados “anticipados” o “brotes de verano”, los que detienen su crecimiento en forma más tardía.

Las yemas florales son simples y comienzan a crecer en la primavera, abriendo en un período de 3-4 semanas. Cada yema floral origina una inflorescencia racimosa, cuyas flores darán origen al fruto. Los estados de desarrollo de la yema floral distinguibles son (Fig. 1.3):

- Yema cerrada: no existe hinchazón visible y las escamas de las yemas se encuentran completamente cerradas.
- Yema hinchada: la hinchazón de las yemas es visible y sus escamas se encuentran separadas.
- Quiebre de yema: las escamas de las yemas se encuentran separadas y se visualizan las puntas de las flores.
- Racimo apretado: se distinguen las flores individuales.
- Botón rosado temprano: las flores se encuentran parcialmente expandidas y se han separado; los pétalos aparecen cortos y cerrados.
- Botón rosado tardío: las flores individuales se encuentran plenamente desarrolladas y separadas; las corolas expandidas, pero aún cerradas.
- Inicio floración: algunas corolas están totalmente expandidas y abiertas; muchas flores se encuentran todavía cerradas.
- Plena floración: la mayoría de las flores de la planta se encuentran abiertas.
- Caída de pétalos: las corolas están cayendo, dejando al descubierto los frutos verdes pequeños. Es la etapa más vulnerable al daño por heladas.

El porcentaje de cuaja de frutos puede variar desde 40% hasta cerca de 100%, dependiendo de las condiciones ambientales durante la fertilización de las flores, de la provisión de insectos polinizadores y de la ocurrencia de polinización cruzada. Es bien sabido que la cuaja de frutos en arándano alto es aumentada por la polinización cruzada, aunque este efecto es dependiente de la variedad. Además, los frutos provenientes de polinización cruzada presentan un mayor tamaño y una maduración más temprana que frutos provenientes de autopolinización, lo que estaría explicado por su mayor número de semillas producto de una adecuada polinización y cuaja. Los estados de desarrollo del fruto son (Fig. 1.3):

- Fruto verde: las bayas están en expansión y su tamaño puede variar dentro de un mismo racimo.
- Fruto en pinta: las bayas están cambiando su color desde verde a rosado - azul.
- 25% azul: bayas maduras y listas para la primera cosecha.
- 75% azul: las bayas se cosechan en la medida que van madurando.



Figura 1.3. Estados de desarrollo de la yema floral (A, yema cerrada; B, yema hinchada; C, quiebre de yema; D, racimo apretado); de la yema vegetativa (E, punta verde temprana; F, punta verde tardía; G, brotes en expansión), de la flor (H, botón rosado temprano; I, botón rosado tardío; J, inicio floración; K, plena floración; L, caída de pétalos); y, del fruto (M, fruto verde; N, pinta; O, 25% cobertura azul; P, 75% cobertura azul; Q; inducción yemas para siguiente temporada). Fuente: Adaptado de Schilder et al. (2004)

La inducción o iniciación de las yemas florales ocurre una vez que el brote finalizó su crecimiento de la temporada y bajo condiciones de fotoperiodo corto (< 12 h). Es decir, la inducción floral se produce en la temporada anterior a la temporada de floración. La temperatura también es un factor importante, observándose una adecuada inducción floral con temperaturas medias entre 12-21°C y una casi nula inducción con temperaturas más elevadas (28°C). En variedades de arándanos altos del sur que presentan dos momentos de desarrollo de brotes (brotes de primavera y verano), se han reportado dos momentos de inducción floral en relación directa con la fecha en que cada tipo de brote detiene su crecimiento.

La diferenciación de las partes florales dentro del ápice reproductivo se inicia inmediatamente y la formación de óvulos y granos de polen continúa durante el invierno en variedades de arándano alto del sur. Mientras que en variedades de arándano del norte, la diferenciación se detiene en invierno, se continúa a inicios de primavera y finaliza justo antes de la floración. A lo largo del brote, la diferenciación floral procede en forma basipétala, es decir, desde la yema apical hacia abajo; y dentro de la yema floral, procede en forma acropétala, desde la base del pedúnculo hacia su ápice.

Literatura consultada

- Bañados, P., Strik, B. 2006. Manipulation of the annual growth cycle of Blueberry using photoperiod. *Acta Horticulturae* 715: 65-72.
- Bieniasz, M. 2012. The Differentiation of Highbush Blueberry Flower Buds. *Acta Horticulturae* 932: 117-122.
- Bryla, D. R. 2006. Irrigation of blueberry. Tercer Seminario Internacional de Fertirrigación. Santiago, Chile. <http://www.blueberrieschile.cl/paper/paper65.pdf> (consultado el 06 de Noviembre de 2013).
- Ehrlenfeldt, M.K. 2001. Self- and Cross-fertility in Recently Released Highbush Blueberry Cultivars. *Hortscience* 36: 133-135.
- Ehrlenfeldt, M.K., Martin, R.B. 2010. Seed Set, Berry Weight, and Yield Interactions in the Highbush Blueberry Cultivars (*Vaccinium corymbosum* L.) 'Bluecrop' and 'Duke'. *Journal of the American Pomological Society* 64: 162-172.
- Galleta, G., Hilmerick, D. 1993. Small fruit crop management. Prentice-Hall, New Jersey, USA.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2013. Alternativas para el cultivo de arándanos. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. <http://www.odepa.gob.cl//odepaweb/publicaciones/doc/10015.pdf;jsessionid=BD3CCE32DAABDC2392C54613DA6A8B2D> (consultado el 14 Octubre de 2013).
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2012. Mercado de arándanos, sin nubarrones en el horizonte. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile. <http://www.odepa.cl//odepaweb/publicaciones/doc/7886.pdf;jsessionid=67B276D1248FA6682EBB9D4CDE88FC0D> (consultado el 14 Octubre de 2013).
- Mainland, C.M. 2002. Blueberry Fruit Set and Intervals from Blossoming to Ripening. *Acta Horticulturae* 574: 189-192.
- Pescie, M.A., López, C.G. 2007. Inducción floral en arándano alto del sur (*Vaccinium corymbosum*), var. O'Neal. *Revista de Investigaciones Agropecuarias* 36: 97-107.
- Retamales, J., Hancock, J.F. 2012. Blueberries. CAB International, Wallingford, UK.
- Sánchez, E. 2006. Diagnóstico y proyección de la producción de arándanos en la zona sur de Chile. Tesis de pregrado en Agronomía. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Schilder, A., Isaacs, R., Hanson, E., Cline, B. 2004. A Pocket Guide to IPM Scouting in Highbush Blueberries. Bulletin E-2928. Cooperative Extension Service, Michigan State University, USA.
- Spann, T., Williamson, J., Darnell, R. 2004. Photoperiod and temperature effects on growth and carbohydrate storage in Southern Highbush Blueberry Interspecific Hybrid. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 129: 294-298.
- Sudzuki, F. 2002. Cultivo de frutales menores. Editorial Universitaria, Santiago, Chile.
- Tuell, J.K., Isaacs, R. 2010. Weather During Bloom Affects Pollination and Yield of Highbush Blueberry. *Journal of Economic Entomology* 103: 557-562.
- Yáñez, P., Retamales, J.B., Lobos, G.A., del Pozo, A. 2009. Light Environment within Mature Rabbiteye Blueberry Canopies Influences Flower Bud Formation. *Acta Horticulturae* 810: 471-474.

CAPITULO 2

EL CULTIVO DEL ARANDANO EN EL SUR DE CHILE

2.1 Antecedentes generales

El arándano se introdujo a Chile a principios de la década de 1980, ante la creciente demanda de nuevos cultivos que se adaptaran a las distintas condiciones climáticas del país y debido a la necesidad de aumentar las exportaciones con especies que generaran mayor rentabilidad. En este contexto, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) inició en 1979 el “Programa de Introducción y Evaluación de nuevas alternativas frutícolas”, obteniendo resultados favorables en el establecimiento y adaptación del cultivo del arándano. A su vez, la Universidad Austral de Chile ya había iniciado las primeras experiencias con arándanos en el país en el año 1977, como parte del “Programa de Investigación y Desarrollo Frutícola para el Sur de Chile” (Medel, 1987).

Los primeros huertos comerciales se plantaron en 1985 y se concentraron desde la región del Maule al sur del país. A partir de entonces, el crecimiento de la superficie y producción ha sido sostenido. En 1997 existían 1.172 hectáreas y se producían cerca de 3.000 toneladas de arándanos. En la actualidad, el cultivo se distribuye desde las regiones de Atacama a la de los Lagos, alcanzado una superficie plantada cercana a 14.800 hectáreas y una producción total mayor a 100.000 toneladas (Fig. 2.1). Mayormente se utilizan variedades de arándano alto (*Vaccinium corymbosum* L.), entre las que destacan ‘Duke’, ‘Elliot’, ‘Bluecrop’, ‘Legacy’, ‘Brigitta’, ‘Aurora’ y ‘Liberty’. La mayor parte de la producción nacional es exportada en fresco, convirtiendo a Chile en el segundo mayor exportador a nivel mundial. El período de oferta se inicia en noviembre con cultivares tempranos como ‘O’Neal’ en el norte, alcanzando los máximos volúmenes entre enero y febrero, y finalizando en marzo y principios de abril con cultivares tardíos como ‘Elliot’ en el sur de Chile (los Ríos y los Lagos).

El sur de Chile ha incrementado fuertemente la superficie y producción de arándanos en los últimos años. El aumento de la superficie cultivada entre los años 2006 y 2012 en las regiones de la Araucanía, los Ríos y los Lagos fue 116%, 147% y 135%, respectivamente; y, actualmente 34% de la superficie cultivada y 24% de la producción a nivel nacional se concentran en la mencionada zona geográfica. En la zona, el cultivo posee un alto nivel tecnológico, lo que incluye la utilización de sistemas de riego tecnificado en prácticamente la totalidad de la superficie (especialmente riego por goteo), la aplicación de fertilizantes a través del sistema de riego, el uso de sistemas de control de heladas, la aplicación de poda invernal anual, el uso de “mulch” plástico, entre otros.

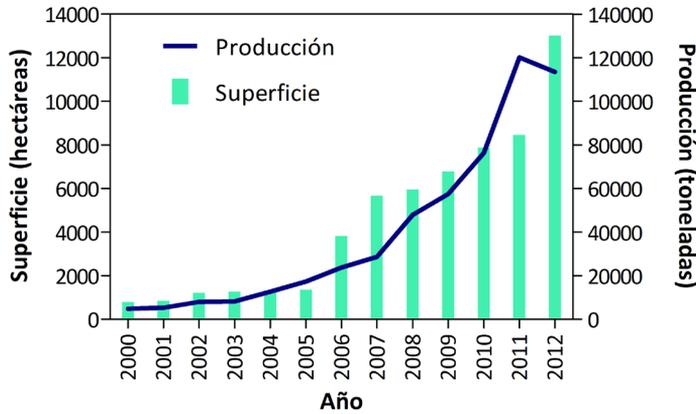


Figura 2.1. Superficie cultivada y producción de arándanos en Chile en los últimos 12 años.

Fuente: ODEPA (2013)

Las principales variedades cultivadas en el sur de Chile corresponden a 'Elliot', 'Brigitta' y 'Legacy'. 'Elliot' y 'Brigitta' son variedades de arándano alto del Norte y 'Legacy' es una variedad de arándano alto del sur, con menor requerimiento de frío. 'Brigitta' y 'Legacy' son variedades de media estación, cuya cosecha en la zona sur se extiende desde fines de diciembre a fines de febrero. Mientras que 'Elliot' es una variedad tardía que se cosecha entre mediados de enero y principios de abril. En la Fig. 2.2 se presenta una aproximación de las épocas de ocurrencia de los estados fenológicos del arándano en la zona sur de Chile.

ESTADO	Meses											
	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr
Dormancia												
Brotación												
Floración												
Cuaja												
Fruta Verde												
Pinta												
Fruta Madura												
Post cosecha												

Figura 2.2. Diagrama referencial de la ocurrencia de los diferentes estados fenológicos del arándano en la zona sur de Chile.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

2.2 Marco edafoclimático del sistema productivo

La zona sur de Chile se caracteriza por la existencia de diferentes agroclimas. Los agroclimas Carillanca, Osorno y La Unión, poseen un clima Mediterráneo frío; el agroclima Valdivia presenta un clima Marino cálido; el agroclima Mariquina presenta un clima Marino; y los agroclimas Loncoche, Purranque y El Tepual, poseen un clima Marino fresco. Las características climáticas de los principales agroclimas de la zona sur de Chile se presentan en el Cuadro 2.1. Para mayor información consultar Novoa y Villaseca (1989) y Montaldo y Fuentes (1981).

Cuadro 2.1. Características climáticas de los principales agroclimas del sur de Chile.

Agroclima	Variable climática				
	TMa (°C)	ST (grados-días)	HF (h)	Ppa (mm)	ETPa (mm)
Vilcún	9,7	1.720	3.247	2.555	1.141
Carillanca	10,0	1.824	2.346	1.394	1.086
El Tepual	10,7	2.071	1.394	2.021	709
Purranque	10,9	2.154	2.105	1.542	833
Osorno	11,4	2.340	1.955	1.383	868
La Unión	11,6	2.384	1.797	1.267	s/i
Valdivia	12,2	2.613	1.609	2.532	938
Loncoche	12,5	2.737	1.449	2.137	901

TMa, temperatura media anual; PLH, período libre de heladas; ST, suma térmica con temperatura base 5°C; HF, horas frío acumuladas con temperatura base 5°C; Ppa, precipitación anual; ETPa, evapotranspiración anual; s/i, sin información.

Fuente: Adaptado de Novoa y Villaseca (1989)

Existen importantes diferencias en las variables climáticas de los agroclimas del sur de Chile (Cuadro 2.1). Estas diferencias se repiten en el período de déficit hídrico. Por ejemplo, el agroclima El Tepual presenta solo un mes (enero) en que la evapotranspiración potencial supera a las precipitaciones. Mientras que, en los agroclimas Valdivia y Loncoche, este período abarca 4 meses, desde noviembre a marzo. Por su parte, los agroclimas Carillanca y Osorno presentan un periodo de déficit hídrico más prolongado (5-6 meses), específicamente entre octubre y marzo.

En Chile, el 43% de suelos arables (cerca de 2.365.000 hectáreas) se han originado a partir de materiales volcánicos piroclásticos, particularmente en la zona centro-sur y sur de Chile, coincidiendo con la zona principal de producción de arándanos. Las arcillas que se originan por la alteración de estos materiales volcánicos, usualmente, corresponden a minerales estructuralmente desordenados (amorfos) o de ordenamiento de rango corto, tales como “alofán” e “imogolita”, que le imprimen propiedades y características muy particulares a los suelos volcánicos.

Los suelos volcánicos de Chile están constituidos principalmente por Andisoles y minoritariamente por Ultisoles, conocidos como “trumaos” y “rojo arcillosos”, respectivamente (Fig. 2.3). En menor proporción, existen suelos volcánicos que pertenecen a los órdenes Inceptisoles, Entisoles y Alfisoles. También dentro de los Andisoles se incluyen los suelos “ñadis”, que corresponde a suelos planos y delgados sobre un substrato de grava y bolones, con restricciones al crecimiento de raíces y a la percolación del agua debido a la presencia de un horizonte plácico cementado por óxidos de hierro y sílice (“fierrillo”) entre el suelo y el substrato.

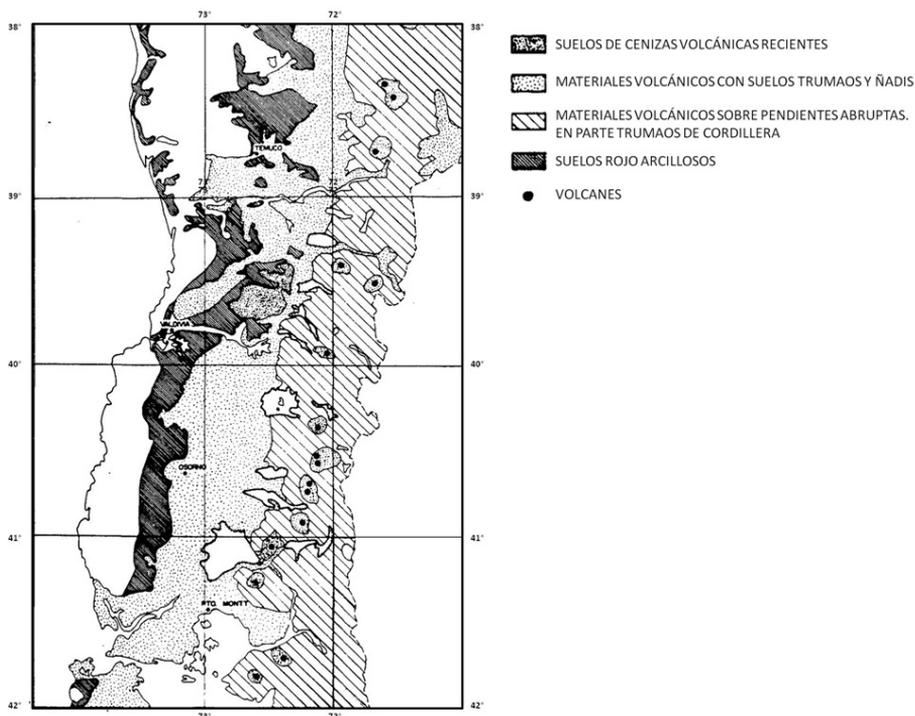


Figura 2.3. Mapa de distribución de suelos derivados de materiales volcánicos en el sur de Chile. Fuente: Adaptado de Besoain (1991)

Los “trumaos” son los suelos volcánicos más utilizados para el cultivo del arándano en la zona sur de Chile. Son considerados suelos jóvenes, aunque existen diferencias en su grado de desarrollo de acuerdo a su posición fisiográfica. Así, los suelos “trumaos” de la cordillera y precordillera de los Andes son más jóvenes que los ubicados en la Depresión Intermedia y Cordillera de la Costa (Fig. 2.3). En general, los suelos “trumaos” son suelos permeables, friables, no plásticos; de textura franca, franco limosa o franco arcillosa, con altos contenidos de materia orgánica (8-20%), alta porosidad (60-70%), baja densidad aparente ($< 0,9 \text{ g cm}^{-3}$) y de un pH moderadamente ácido a ácido (5,2-6,0). Su mineralogía está dominada por arcillas “amorfas” (alofán e imogolita) con elevada

capacidad de retención de agua y de fosfatos. Lo anteriormente descrito determina que los suelos “trumaos” posean propiedades físicas sobresalientes, aunque su fertilidad se ve limitada debido principalmente a dos factores: alta retención de fósforo y una moderada acidificación.

Los suelos “rojo arcillosos” son suelos más antiguos, profundos, de alto contenido de arcilla, de pH fuertemente ácido (5,1-5,5) y de difícil laboreo fuera de su punto de friabilidad. Su densidad aparente ($1,0-1,4 \text{ g cm}^{-3}$) es mayor que la de los suelos “trumaos” y su contenido de materia orgánica (4-13%) es menor. Debido a estas características, a su menor extensión y a su posición geográfica y fisiográfica, han sido menos utilizados para el cultivo del arándano en la zona sur de Chile (Fig. 2.3). Su mineralogía dominada por arcillas 1:1 del tipo haloisítico y methaloisítico determina una menor capacidad de fijación de fósforo que los “trumaos”.

2.3 Componentes del rendimiento en arándano

El rendimiento en arándano está determinado por distintos componentes:

$$\text{Rend} = \text{NCañ}_{PI} \times \text{NYFL}_{Cañ} \times \text{NFI}_{Y} \times \%CJ \times \text{PesoFrut}$$

donde,

Rend: rendimiento por planta (kg planta^{-1}).

NCañ_{PI}: número de cañas por planta.

NYFL_{Cañ}: número de yemas florales por caña.

NFI_Y: número de flores por yema.

%CJ: porcentaje de cuaja.

PesoFrut: peso promedio individual del fruto.

Estos componentes de rendimiento interactúan entre sí. Por ejemplo, un mayor número de yemas florales por caña se traduce en un mayor número de frutos por caña, pero ello disminuye el tamaño y peso de fruto (interacción negativa). En cambio, otras interacciones han sido reportadas como positivas o neutras.

Cada componente de rendimiento está determinado por factores genéticos, ambientales y de manejo. El **número de cañas por planta** está determinado por la variedad, edad de la planta y por el manejo de la poda. El componente **número de yemas florales por caña** depende de la variedad, de factores que afectan la inducción floral de las yemas y del vigor de las cañas y brotes. Así, se han reportado entre 4 y 12 yemas florales por caña, para distintas variedades de arándano alto. Sin embargo, esta variabilidad puede también ser explicada por el vigor de las cañas, ya que cañas más gruesas desarrollan más yemas florales que cañas delgadas, independientemente del cultivar. Además, a mayor largo del brote, mayor número potencial de yemas florales por caña.

Por su parte, el componente **número de flores por yema** es variable, particularmente debido a la posición de las yemas en el brote, observándose una menor cantidad de flores por yema en las posiciones más alejadas del ápice de la ramilla. Otro factor afectando este componente es la variedad. Por ejemplo, se han contabilizado en promedio 11 flores por yema en 'Elliot' y 5 flores por yema en 'Cooper'.

El componente **porcentaje de cuaja** depende de las condiciones ambientales durante la fertilización de las flores, de la provisión de insectos polinizadores y de la ocurrencia de polinización cruzada. Se han publicado niveles de cuaja entre 40% hasta casi 100% en arándano alto; y se encuentra bien establecido que la polinización cruzada favorece este componente.

El **peso del fruto** está positivamente correlacionado con el número de semillas, el que a su vez es afectado por el tipo de polinización. Por ejemplo, la polinización abierta aumentó el peso de fruto de cuatro variedades de arándano alto, entre 50% y 100%, en comparación a la autopolinización, lo que fue correlacionado positivamente con el número de semillas en los frutos. Sin embargo, existen otros factores que contribuyen a la variabilidad del tamaño de fruto, tales como la variedad, disponibilidad de agua y manejo de la poda. Se ha medido una disminución de hasta 60% del peso del fruto debido a déficit hídrico. También, se ha señalado una correlación positiva entre el largo y diámetro de ramilla con la calidad de las yemas florales y de éstas, con el calibre potencial de los frutos.

En resumen, el rendimiento en arándano es resultado de complejas interacciones entre sus componentes. Una de las prácticas de manejo que afecta fuertemente los componentes de rendimiento con mayor incidencia en el rendimiento (número de cañas por planta, número de yemas florales por caña, peso del fruto) es **la poda**. Por lo tanto, es una herramienta fundamental para diseñar el rendimiento a alcanzar en cada temporada. En este contexto, es importante destacar que para lograr una producción sostenida de fruta de alta calidad y alargar la vida útil de las plantas, la poda debe realizarse en forma anual. Esto genera arbustos con menor número de cañas, pero conlleva a frutos de mayor tamaño y, generalmente, a mayores rendimientos. Por otro lado, la poda aumenta la penetración de la luz en el dosel y promueve la formación de yemas florales. Además, los frutos maduran precozmente y se reducen los tiempos de cosecha.

2.4 Rendimientos alcanzables en arándano en el sur de Chile

El rendimiento a alcanzar por el cultivo del arándano varía en función de las condiciones edafoclimáticas de cada lugar, las que determinan el potencial productivo del cultivo, a partir de un potencial genético (variedad). También, depende del nivel tecnológico o manejo de cada huerto, especialmente en lo que respecta a la poda y la carga frutal.

Adicionalmente, el rendimiento de los arándanos varía en función de la edad de las plantas. En general, la producción se inicia al segundo o tercer año desde la plantación, pudiendo obtenerse entre 1 y 4 t ha⁻¹. Esta cosecha se incrementa en el tiempo hasta alcanzar la plena producción al séptimo u octavo año, estabilizándose alrededor de 12 a 15 t ha⁻¹. En algunos casos, con determinados cultivares se han registrado rendimientos superiores a 20 t ha⁻¹. La magnitud del “peak” de producción depende de la variedad cultivada. Sin embargo, en una misma zona edafoclimática, cultivares tardíos alcanzan mayores rendimientos que cultivares tempranos.

En la zona sur de Chile, dadas las favorables condiciones edafoclimáticas en las que se desarrolla el cultivo, los rendimientos alcanzados son calificados como altos. Se han registrado rendimientos de hasta 24 t ha⁻¹, con una mayor frecuencia de huertos con rendimientos entre 7 y 15 t ha⁻¹. Sin embargo, los datos recolectados durante la ejecución del Proyecto FIA PYT 2009-0080 indican que existiría una brecha entre los rendimientos actuales y los rendimientos alcanzables, los que serían de aproximadamente 26 t ha⁻¹ en ‘Elliot’ y 20 t ha⁻¹ en ‘Brigitta’ con una densidad de plantación entre 3.333 y 4.444 plantas ha⁻¹. Además, para un huerto de arándano con un rendimiento potencial alto en el sur de Chile, la curva de producción en el tiempo (a través de los años) fue descrita con una curva sigmoidea.

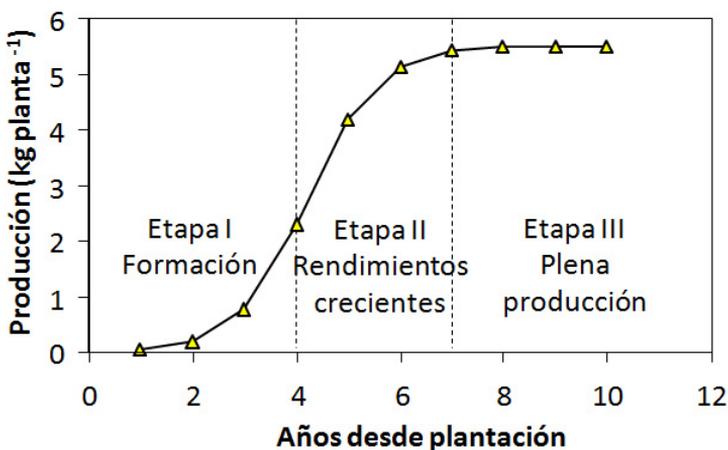


Figura 2.4. Curva de producción de un huerto de arándano en el sur de Chile, con rendimientos potenciales altos y una densidad de plantación de 3.333 plantas ha⁻¹.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Como se muestra en la Fig. 2.4, cuando las plantas se encuentran en formación en los primeros años desde la plantación, las primeras producciones no superan 1 kg por planta. Luego en la etapa de rendimientos crecientes (4-7 años), los rendimientos aumentan hasta alcanzar la etapa de rendimientos estables (> 7 años), en la cual sería posible producir hasta 5,5 kg por planta.

Por otra parte, la predicción adecuada del rendimiento de los huertos es clave para los productores y exportadoras de arándano. Para las exportadoras, es clave para la estimación de los volúmenes de exportación que permita realizar una gestión eficiente en el mercado internacional. Para los productores, es la información básica para la planificación de la cosecha y para el diseño de una fertilización óptima con fines tanto productivo, económico y ambiental. En este sentido, la predicción del “rendimiento a alcanzar” cada temporada es un dato necesario para estimar la demanda anual de nutrientes, de acuerdo al modelo de fertilización desarrollado por Rodríguez et al. (2001) (ver Capítulo 3). Una de las principales falencias en la aplicación de este método de fertilización racional en los huertos del sur de Chile, era la incerteza en el cálculo de la demanda nutricional, debido a la dificultad de estimación de los “rendimientos alcanzables”, dada la alta variabilidad de este parámetro a nivel espacial y temporal.

El rendimiento de los frutales se estima usualmente conociendo el número de yemas por planta y el porcentaje de cuaja, lo que permite calcular el número de frutos por planta; y el peso de fruto, como otra variable independiente. De esta forma, en Chile, el rendimiento del arándano se ha predicho tradicionalmente en base al siguiente modelo:

$$\mathbf{Rend = NFrut_Pl \times PesoFrut}$$

donde,

Rend: rendimiento por planta (kg planta⁻¹).

NFrut_Pl: número de frutos por planta.

PesoFrut: peso promedio individual del fruto.

Los frutos por planta se estiman a partir del conteo de yemas florales después de la poda, asumiendo un cierto número de frutos producidos por yema y un cierto peso de fruto. En Chile, se han utilizado factores de 6-8 frutos por yema floral y entre 1,3 a 1,8 g por fruto. Sin embargo, los supuestos usados no distinguen mayormente por variedad ni edad de las plantas, ni tampoco consideran la pérdida de yemas florales, flores o frutos debido a heladas u otros.

El Proyecto FIA PYT 2009-0080 realizó la predicción de rendimiento durante dos temporadas en 24 cuarteles de arándano distribuidos entre las regiones de la Araucanía y los Lagos, y posteriormente contrastó los rendimientos estimados con el rendimiento por planta medido a la cosecha (Fig. 2.5). Para la predicción del rendimiento se aplicó el método tradicional usado en Chile, contando las yemas florales después de la poda en 10 plantas por hilera en cada cuartel y usando los factores 6-8 frutos por yema y 1,4-1,8 g por fruto, que parecen adaptarse adecuadamente a las variedades ‘Elliot’ y ‘Brigitta’.

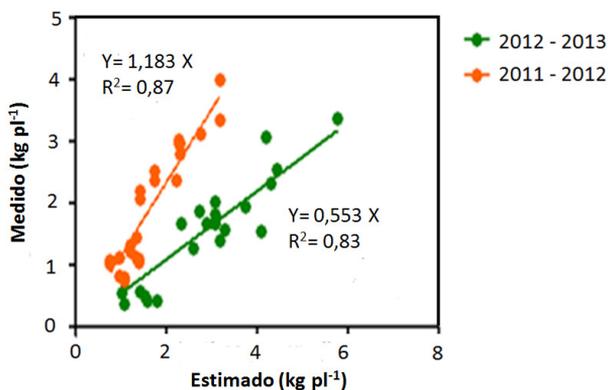


Figura 2.5. Relación entre el rendimiento real medido a la cosecha y el rendimiento predicho mediante la metodología de conteo de yemas reproductivas.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

En la Fig. 2.5 se muestra que durante ambas temporadas, los datos estimados y medidos se relacionaron en forma lineal. En la temporada 2011-2012, la estimación del rendimiento fue muy precisa, con una recta ajustada a los datos de pendiente 1,18, lo que significa que el método de conteo de yemas subestimó el rendimiento registrado a la cosecha en 18%. En cambio, durante la temporada 2012-2013, que registró intensas heladas en noviembre de 2012, la predicción de rendimiento del modelo fue muy pobre, aunque describe perfectamente la tendencia. La pendiente de la línea (0,55) expresa que el modelo sobreestimó el rendimiento real en 55%. Claramente, el método tradicional de predicción de rendimientos en arándano debe ser mejorado, incorporando factores de corrección de acuerdo a las pérdidas de yemas florales por factores climáticos o de otra naturaleza.

Por otro lado, cualquier método de predicción de rendimientos en arándano debe incorporar en sus supuestos, las diferencias en los componentes de rendimiento debido a la variedad e incluso edad de las plantas. En un estudio reciente realizado en Chile, que comprendió el monitoreo de 310 plantas de diferentes variedades y edades de plantas de arándano distribuidas en el norte, centro y sur del país, se registró un factor promedio de 4,3 frutos por yema floral cuando no se hizo distinción por variedad o edad de las plantas. Distinguiendo por variedad se obtuvieron factores que variaron entre 3,8 frutos por yema floral (para 'Elliot') y 7,0 frutos por yema floral (para 'Legacy'). También, se observó una interacción entre la variedad y la edad de las plantas. Por ejemplo, plantas 'Elliot' de 4 años presentaron en promedio 4,9 frutos por yema floral y este valor disminuyó a 3,6 en plantas de 7 años. Este estudio además demostró la necesidad de contar rigurosa y metódicamente el 100% de las yemas florales de las plantas (Salvo et al., 2011).

Literatura consultada

- Bañados, P. 2006. Claves para la poda de arándanos. Revista Agronomía y Forestal UC 25: 28-31.
- Bădescu, C, Bădescu, C., Delian, E., Bădescu, A. 2009. Productivity characteristics of 15- to 40-Year-Old Highbush Blueberry in Romanian Submountaine Areas. Acta Horticulturae 810: 495-500.
- Besoain, E. 1991. Suelos volcánicos de Chile: distribución, origen y mineralogía. Sociedad de Conservación de Suelos de Chile.
- Bieniasz, M. 2007. Effects of open and self pollination of four cultivars of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) on flower fertilization, fruit set and seed formation. Journal of Fruit and Ornamental Plant Research 15: 35-40.
- Bowen, P.A., Eaton, G.W. 1983. Yield component analysis of winter damage and flower buds in highbush blueberry. Scientia Horticulturae 19: 279-286.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN)-Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA).2012. Catastro Frutícola. Principales Resultados. Región de la Araucanía, Región de los Ríos, Región de los Lagos. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.
- Centro de Información de Recursos Naturales (CIREN). 2003. Estudio Agrológico. Descripciones de suelos materiales y símbolos X Región. Tomo I, II. Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.
- Ehlenfeldt, M.K. 2001. Self- and Cross-fertility in Recently Released Highbush Blueberry Cultivars. Hortscience 36: 133-135.
- Ehlenfeldt, M.K., Martin, R.B. 2010. Seed Set, Berry Weight, and Yield Interactions in the Highbush Blueberry Cultivars (*Vaccinium corymbosum* L.) 'Bluecrop' and 'Duke'. Journal of the American Pomological Society 64: 162-172.
- Hancock, J.F. 1989. Why is 'Elliot' so Productive? A Comparison of Yield Components in 6 Highbush Blueberry Cultivars. Fruit Varieties Journal 43: 106-109.
- Honorato, R. 2000. Manual de Edafología. Colección en Agricultura. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- Medel, F. 1987. Árboles frutales. Situación y Potencial en el Sur de Chile. Corporación de Fomento de la Producción y Universidad Austral de Chile. Alborada, Valdivia, Chile.
- Montaldo, P., Fuentes, R. 1981. Zonificación agroecológica de la Décima Región de Chile: II. Zonas agroclimáticas. AgroSur 9: 70-75.
- Novoa, R., Villaseca, S. 1989. Mapa Agroclimático de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.
- Oficina de Estudios y Políticas Agrarias (ODEPA). 2013. Boletín frutícola. Avance Febrero 2013. http://www.odepa.cl//odepaweb/serviciosinformacion/Boletines/BFruticola_0313.pdf;jsessionid=5BA0A941F0A1C9CB421653232BD388DD (consultado el 03 de Mayo de 2013).
- Pescie, M.A., López, C.G. 2007. Inducción floral en arándano alto del sur (*Vaccinium corymbosum*), var. O'Neal. Revista de Investigaciones Agropecuarias 36: 97-107.
- Pescie, M., Borda, M., Fedyszak, P., López, C. 2011. Effect of time and intensity of pruning on the yield and fruit quality of southern highbush blueberries (*Vaccinium corymbosum*) var. O'Neal in Buenos Aires province. Revista de Investigaciones Agropecuarias 37:268-274.
- Pritts, M.P., Hancock, J.F. 1985. Lifetime Biomass Partitioning and Yield Component Relationships in the Highbush Blueberry, *Vaccinium corymbosum* L. (Ericaceae). American Journal of Botany 72: 46-452.

- Retamales, J., Hancock, J.F. 2012. Blueberries. CAB International, Wallingford, UK.
- Rodríguez, J., Pinochet, D., Matus, F. 2001. Fertilización de los Cultivos. LOM Ediciones. Santiago, Chile.
- Salvo, S., Muñoz, C., Ávila, J., Bustos, J., Cariaga, E., Silva, C., Vivallo, G. 2011. Sensitivity in the estimation of parameters fitted by simple linear regression models in the ratio of blueberry buds to fruits in Chile using percentage counting. *Scientia Horticulturae* 130: 404-409.
- Salvo, S., Muñoz, C., Ávila, J., Bustos, J., Ramírez-Valdivia, M., Silva, C., Vivallo, G. 2012. An estimate of potential blueberry yield using regression models that relate the number of fruits to the number of flower buds to climatic variables. *Scientia Horticulturae* 133: 56-63.
- Sánchez, E. 2006. Diagnóstico y proyección de la producción de arándanos en la zona sur de Chile. Tesis de pregrado en Agronomía. Universidad Austral de Chile, Valdivia, Chile.
- Spann, T., Williamson, J., Darnell, R. 2004. Photoperiod and temperature effects on growth and carbohydrate storage in Southern Highbush Blueberry Interspecific Hybrid. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 129: 294-298.
- Strik, B., Buller, G., Hellman, E. 2003. Pruning severity affects yield, berry weights, and hand harvest efficiency of highbush blueberries. *HortScience* 38: 196-199.
- Strik, B., Fisher, G., Hart, J., Ingham, R., Kaufman, D., Penhallegon, R., Pscheidt, J., William, R., Brun, C., Ahmedullah, M., Antonelli, A., Askham, L., Bristow, P., Havens, D., Scheer, B., Shanks, C., Barney, D. 2006. Blueberry pruning. <http://berrygrape.org/blueberry-pruning/> (consultado el 03 de Mayo de 2013).
- Susuki, A., Kawata, N. 2001. Relationship between Anthesis and Harvest Date in Highbush Blueberry. *Journal of the Japanese Society for Horticultural Science* 70: 60-62.
- Tosso, J. 1985. Suelos Volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Ministerio de Agricultura, Gobierno de Chile.
- Williamson J.G., Miller, E.P. 2002. Early and mid-fall defoliation reduces flower bud number and yield in southern highbush blueberry. *HortTechnology* 12: 214-216.
- Yáñez, P., Retamales, J.B., Lobos, G.A., del Pozo, A. 2009. Light Environment within Mature Rabbiteye Blueberry Canopies Influences Flower Bud Formation. *Acta Horticulturae* 810: 471-474.

CAPITULO 3

EL CULTIVO DEL ARANDANO EN EL SUR DE CHILE

3.1 Marco conceptual

Cuando un ingeniero agrónomo es consultado por un productor de arándanos sobre la necesidad de diseñar o modificar la fertilización de un huerto, se deben seguir las siguientes fases para lograr una intervención exitosa desde el punto de vista productivo, económico y medioambiental (Fig. 3.1).

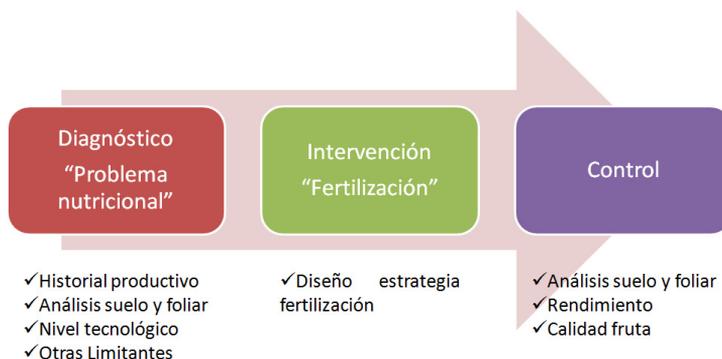


Figura 3.1. Esquema del modelo de intervención de un huerto frutal para la resolución de un problema nutricional.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Primero, se debe realizar un adecuado diagnóstico productivo y nutricional del huerto; analizando los registros históricos de rendimientos, en el contexto del nivel tecnológico del productor (sistema riego, control de heladas, poda), de las limitaciones climáticas y/o edáficas, y cualquier otra limitante del agroecosistema (incidencia de plagas y/o enfermedades). Por lo tanto se deben recopilar y estudiar los registros productivos, análisis químicos y físicos de suelo, análisis foliares, historial de aplicaciones de fertilizantes y enmiendas, entre otros, para identificar el problema productivo. Si el problema identificado es de tipo "nutricional", el segundo paso de la intervención corresponde al diseño de una estrategia fertilización ajustada a las condiciones particulares del huerto y sus cuarteles. Esto es, considerando el tipo de suelo, el suministro de nutrientes del suelo, el rendimiento posible de alcanzar de acuerdo a la edad productiva y variedad de las plantas de cada cuartel, y al nivel tecnológico del huerto.

Finalmente, se debe generar un plan de control de la intervención que permita evaluar su efecto en el estado nutricional de los cuarteles (análisis foliar) y en el rendimiento y calidad de fruta producida. Los resultados de este plan de control indicarán si la estrategia de intervención debe mantenerse o modificarse en una siguiente temporada.

El cumplimiento de estas etapas permitirá responder al problema nutricional particular de cada sitio (fertilización de precisión) en forma ordenada y racional, a través de una fertilización de corrección y/o de mantención diseñada “a la medida”; así como también, permitirá una evaluación objetiva de la calidad de intervención que guiará las futuras modificaciones de la misma.

Para cada una de las fases de la intervención, especialmente diagnóstico y control, se pueden utilizar distintas herramientas que se describen a continuación y que fueron desarrolladas para las condiciones productivas del sur de Chile, a través de la ejecución del Proyecto FIA PYT 2009-0080.

3.2 Uso del análisis de suelo para evaluar el suministro de nutrientes del suelo

El suministro de los nutrientes está dado por la capacidad que tiene el suelo de reponer, durante la estación de crecimiento, una cantidad de nutrientes a la solución, desde donde las raíces de los cultivos los absorben. Sin embargo, debe considerar la eficiencia de absorción del cultivo, ya que la capacidad de las plantas para recuperar los nutrientes desde la solución del suelo variará dependiendo de las características del sistema radical y de las interacciones cultivo-suelo.

Para estimar el suministro de nutrientes del suelo, se cuenta con el análisis de suelo, que corresponde a una extracción química desde una muestra representativa de un volumen de suelo, cuyo objetivo es estimar la disponibilidad de nutrientes para la temporada de crecimiento del huerto frutal.

El análisis de suelo se ha constituido en una herramienta esencial para caracterizar el suelo en tres ámbitos: (a) parámetros de suelo relacionados con su capacidad de reposición de nutrientes a la solución (reactividad de las arcillas y capacidad tampón de cada nutriente), expresados en parámetros como aluminio extractable y capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE); (b) parámetros de suelo relacionados a la condición del sitio, tales como pH del suelo (asociado a toxicidad por elementos como aluminio y manganeso), especies iónicas dominantes, salinidad, entre otros; y (c) niveles de disponibilidad de los diferentes nutrientes de acuerdo al mecanismo de disponibilidad dominante en un suelo. En plantaciones frutales, es recomendable realizar un análisis de suelo previo a la plantación y luego, cada tres a cinco años para monitorear los niveles de disponibilidad de cada nutriente y la condición del sitio (acidez, basicidad o salinidad), de acuerdo al plan de fertilización diseñado.

La **interpretación agronómica** del análisis de suelo, usualmente, requiere de un proceso **calibración**, el cual relaciona el valor analítico con el rendimiento y/o absorción alcanzados por el cultivo en un agroecosistema (Fig. 3.2). Este proceso es necesario, ya que la respuesta en rendimiento de un cultivo o frutal bajo diferentes niveles de disponibilidad de un nutriente en el suelo, es variable entre distintas zonas edafoclimáticas.

La calibración de un análisis de suelo se realiza con experimentos de campo con diferentes niveles de disponibilidad de un nutriente en el suelo. Para evitar las variaciones locales de cada zona edafoclimática, la respuesta del cultivo en rendimiento se expresa como rendimiento relativo (%) al rendimiento máximo, obtenido con niveles no limitantes del nutriente en el suelo. Así, el rendimiento relativo aumenta con el nivel de disponibilidad del nutriente en el suelo hasta llegar al 100% (Fig. 3.2).

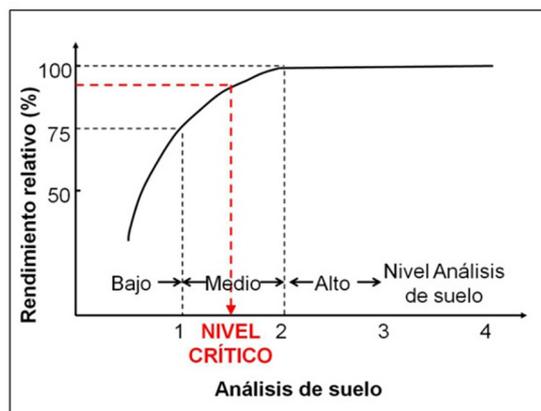


Figura 3.2. Relación entre el nivel de disponibilidad de un nutriente en el suelo y el rendimiento de un cultivo o frutal en términos relativos.

Fuente: Adaptado de Bernier (1999)

Estos estudios de calibración permiten definir el **nivel crítico** en el suelo del nutriente bajo estudio, el cual se evalúa en el rendimiento relativo 95-100% del rendimiento máximo y se interpreta como aquel nivel sobre el cual no existiría respuesta a la fertilización. Por tanto, permite definir situaciones en las que se debe hacer una **fertilización de corrección** (para alcanzar ese nivel crítico) y en las que solo se debe hacer una **fertilización de mantención** (para mantener ese nivel crítico en el tiempo).

3.2.1 Niveles críticos de nutrientes para arándanos cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile

La determinación de los niveles críticos para los nutrientes Nitrógeno (N), Fósforo (P), Potasio (K), Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Azufre (S) y Cobre (Cu); y para el elemento tóxico Aluminio (Al) (ver Capítulo 5), se realizó en base a la información obtenida desde ensayos de campo establecidos en cinco huertos de arándanos ubicados en las regiones de los Lagos y de los Ríos. Estos ensayos fueron evaluados durante dos temporadas (2009-10 y 2010-11) e incluyeron plantas > 4 años de los cultivares 'Brigitta' y 'Elliot', en suelos con diferentes niveles de disponibilidad de cada nutriente. Los niveles iniciales de cada nutriente se establecieron mediante análisis de suelo a 20 cm de profundidad, usando la siguiente metodología diseñada para que la muestra sea representativa del área muestreada (cuartel):

- Definir unidades homogéneas de muestreo (similar tipo de suelo, manejo, variedad, historial productivo). Generalmente corresponde a un cuartel del huerto.
- En cada unidad homogénea, seleccionar 5 o 6 puntos de muestreo.
- En cada punto de muestreo, extraer 5 submuestras de suelo de acuerdo a la Fig. 3.3. Esto es, en forma equidistante, cubriendo 0,5 metros a cada lado de la planta con el objetivo de abarcar el área teórica de exploración de las raíces.
- Cada submuestra debe ser tomada a 20 cm de profundidad con un barreno o pala.
- Mezclar las submuestras en un recipiente limpio para formar una muestra compuesta de la correspondiente unidad homogénea.
- Desde la muestra compuesta, tomar 1 kg de suelo aproximado y enviar al laboratorio debidamente identificada (cuartel, profundidad, fecha y otros datos relevantes) en una bolsa de plástico limpia.
- Es importante considerar que la muestra debe ser enviada lo antes posible al laboratorio y no debe ser expuesta al sol directo o a fuentes de calor. De no ser posible, se recomienda secar la muestra al aire en una capa delgada y almacenar a una temperatura de 4°C.

El análisis de los datos de rendimiento relativo en función de los niveles de disponibilidad de nutrientes en el suelo, permitió establecer con claridad los niveles críticos para arándanos cultivados en suelos volcánicos para los nutrientes **P y K**; es decir, el nivel en el suelo que permite alcanzar 95% del rendimiento máximo. Para P, el nivel crítico fue establecido en **16 ppm P-Olsen** y para K, en **100 ppm K intercambiable** (Fig. 3.4). Los niveles críticos determinados son muy similares a los establecidos por guías de fertilización de los servicios de extensión de las Universidades de Oregon y Idaho en USA. Sin embargo, son menores a lo recomendado por la literatura nacional.

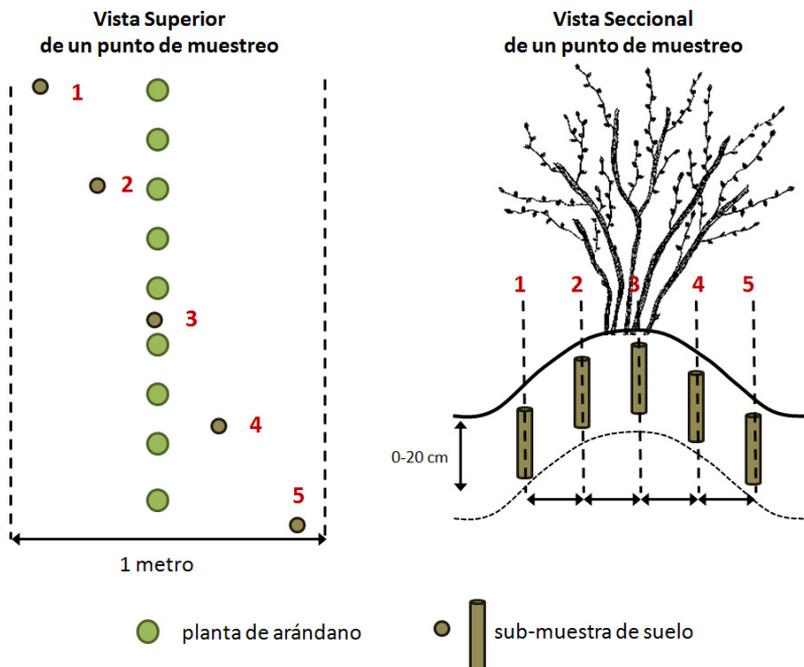


Figura 3.3. Esquema de muestreo de suelo en la hilera de plantación para un punto de muestreo.
Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Para **Ca, Mg, S y Cu**, no se observó una respuesta clara de los rendimientos a los distintos niveles de disponibilidad de esos nutrientes en el suelo. Se registraron rendimientos cercanos a los rendimientos máximos con fertilización (rendimiento relativo ~ 1), en suelos no fertilizados, incluso en los niveles de disponibilidad más bajos testeados en este estudio. Esto indica que esos nutrientes no fueron limitantes para la producción, incluso a niveles de disponibilidad de **0,6 cmol₊ kg⁻¹ para Ca, 0,2 cmol₊ kg⁻¹ para Mg, 13 ppm para S y 0,9 ppm para Cu**. Como referencia, la Universidad de Oregon (USA) ha reportado como niveles de suelo suficientes para arándanos: 2,5 cmol₊ kg⁻¹ para Ca, 0,6 cmol₊ kg⁻¹ para Mg y 0,6 ppm para Cu. Los resultados obtenidos en el presente estudio deberán ser afinados a futuro, para encontrar los niveles críticos que permitan determinar con claridad el valor de disponibilidad de cada uno de estos nutrientes bajo el cual disminuye el rendimiento. Sin embargo, es posible señalar que los niveles críticos para **Ca, Mg, S y Cu** estarían por debajo de los niveles propuestos en este estudio.

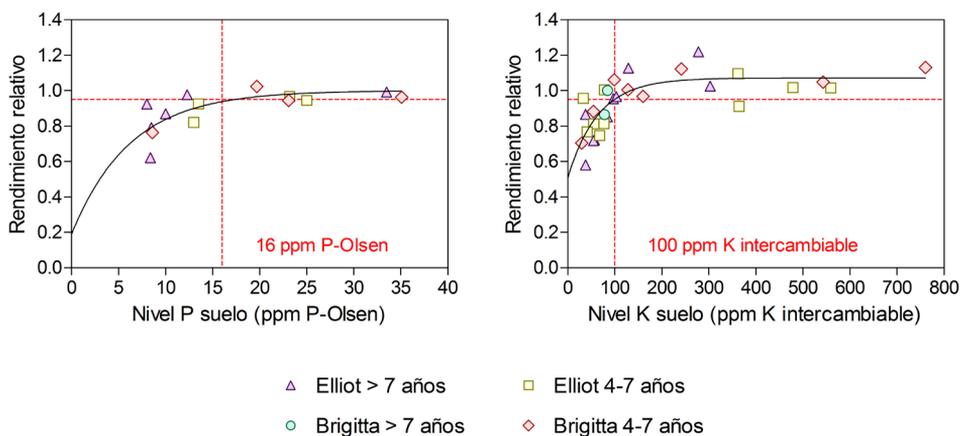


Figura 3.4. Relación entre el nivel de disponibilidad de P y K en el suelo y el rendimiento relativo de arándanos cultivados en el sur de Chile durante las temporadas 2009-10 y 2010-11. Valores promedio de 3 repeticiones. Línea negra corresponde a línea de regresión.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

En el caso del N, se decidió incorporar el N-mineral como un indicador del estatus de N en el suelo debido a que en suelos ácidos, el N-mineral permanecería en gran parte como amonio (N-NH_4^+), lo que le permitiría tener una dinámica similar al K. En este contexto, se evaluó la dinámica de la disponibilidad del N-mineral (sin aplicación de fertilizante nitrogenado) en dos profundidades de suelo (0-20 y 20-40 cm) en ensayos ubicados en cinco huertos comerciales de las regiones de los Ríos y los Lagos. La evaluación realizada durante dos temporadas (2009-10 y 2010-11) permitió establecer una relación lineal en la disponibilidad de N-mineral medida a 0-20 cm y a 0-40 cm de profundidad, como se observa en la Fig. 3.5. Esto, en términos prácticos, significa que la información de análisis de suelo proveniente de muestras obtenidas a 0-20 cm de profundidad, se puede extrapolar a 0-40 cm de profundidad, lo que simplifica el muestreo de suelo sin perder precisión en forma significativa.

Además, para la determinación del nivel crítico de N en el suelo, en cada ensayo se aplicaron 5 tratamientos de fertilización N (0, 55, 110, 165, y 220 kg N ha^{-1}) para crear distintos niveles de disponibilidad de N en el suelo. La disponibilidad de N-mineral en cada unidad experimental se monitoreó cada 21 días a través de análisis de suelo de muestras obtenidas a 0-20 y 20-40 cm de profundidad. Durante las dos temporadas evaluadas, se observó una disminución del rendimiento con niveles de N-mineral en el suelo entre **50 y 60 ppm**, lo que podría estar asociado a toxicidad en las plantas de arándano por exceso de N (Fig. 3.6). Este valor crítico representa el valor promedio de N-mineral medido a 0-40 cm de profundidad, entre noviembre y enero de dos temporadas de estudio.

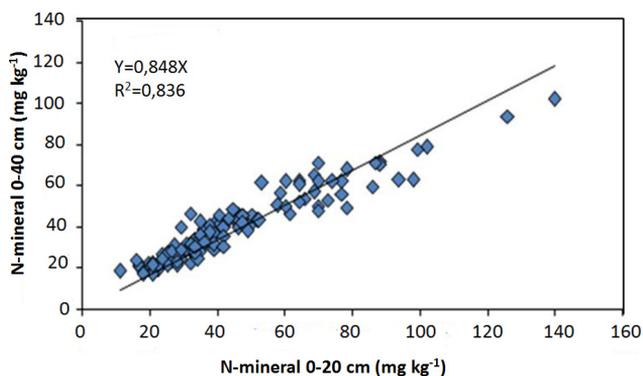


Figura 3.5. Relación entre la disponibilidad de N-mineral medida a 0-20 cm y a 0-40 cm de profundidad de suelo durante la temporada 2010-11. N=72. Valores promedio de 3 repeticiones. Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

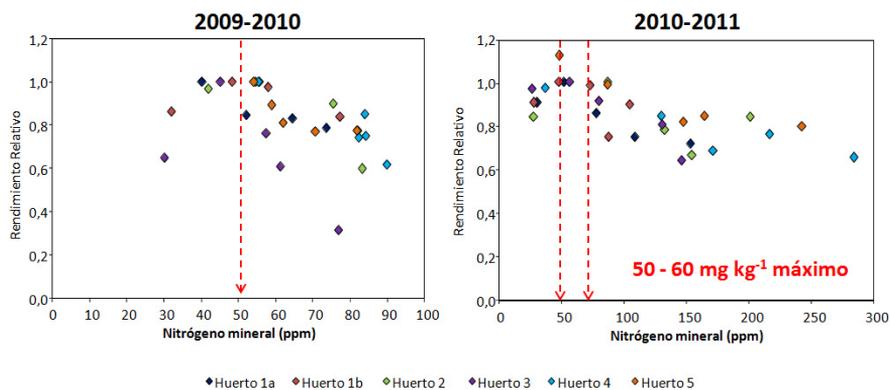


Figura 3.6. Relación entre la disponibilidad de N-mineral en el suelo medida a 0-40 cm de profundidad a principios de temporada y el rendimiento relativo de arándanos cultivados en cinco huertos del sur de Chile. Temporadas 2009-10 y 2010-11. Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

En el Cuadro 3.1 se presenta el resumen de los niveles críticos para los distintos nutrientes evaluados, que aseguran un óptimo rendimiento en huertos de arándano sobre suelos volcánicos del sur de Chile. En el caso de N y Al, los valores propuestos se plantean como niveles de disponibilidad **máximos**, sobre los cuales el cultivo del arándano presentará toxicidad. Para P y K corresponden a niveles mínimos, bajo los cuales el cultivo disminuirá su rendimiento por deficiencia. Para Ca, Mg, S y Cu, los valores corresponden a niveles de disponibilidad en suelos volcánicos, sobre los cuales se puede asegurar que no se presentarán deficiencias en el cultivo.

Cuadro 3.1. Niveles críticos en suelos volcánicos para el cultivo del arándano en el sur de Chile.

Elemento	Nivel crítico
Fósforo (P)	16 mg kg ⁻¹
Potasio (K)	100 mg kg ⁻¹
Calcio (Ca)	> 0,6 cmol _c kg ⁻¹
Magnesio (Mg)	> 0,2 cmol _c kg ⁻¹
Azufre (S)	> 13 mg kg ⁻¹
Cobre (Cu)	> 0,9 mg kg ⁻¹
Aluminio (Al)*	0,2 cmol _c kg ⁻¹
Nitrógeno (N)*	50 – 60 mg kg ⁻¹

*Corresponde al nivel crítico máximo en el suelo

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

3.3 Diseño de la estrategia de fertilización para nutrientes distintos a Nitrógeno

Por razones económicas y ambientales, el diseño de normas de fertilización en arándano debe considerar la demanda de nutrientes, según la etapa y nivel productivo del huerto; el suministro de nutrientes del suelo, según el tipo y manejo del mismo; y, la eficiencia de la fertilización, de acuerdo a la tecnología de aplicación y tipo de suelo (Rodríguez, 1993; Rodríguez et al., 2001). De acuerdo a este **modelo racional**, las dosis de fertilización deben definirse en cada caso particular, ya que tanto fertilizaciones superiores como inferiores a las reales necesidades del huerto impactan negativamente la producción del huerto y/o el medio ambiente a través de contaminación hacia las aguas y el aire.

Para los **nutrientes distintos al N** (ver Capítulo 4), la decisión de **cuándo** y **cuánto** fertilizar en un cuartel de arándano es guiada por la información obtenida en el análisis de suelo y su comparación con los niveles críticos de suelo propuestos en este manual. En este contexto, existen dos tipos de fertilización: (a) **fertilización de corrección**, que debe aplicarse cuando la disponibilidad de los nutrientes medidos en el análisis de suelo es inferior a los estándares recomendados para el cultivo (nivel crítico de suelo); y (b) **fertilización de mantención**, que debe aplicarse cuando la disponibilidad de los nutrientes medidos en el análisis de suelo es similar o superior a los niveles críticos de suelo.

3.3.1 Fertilización de corrección

La fertilización de corrección contempla incrementar el nivel de disponibilidad de los nutrientes hasta alcanzar el nivel crítico de suelo definido para cada elemento (Cuadro 3.1). Para su diseño y aplicación, se debe considerar si el huerto se encuentra establecido o por establecer, y la forma de aplicación de los fertilizantes. Una vez aplicadas las dosis de corrección, se debiera realizar un nuevo análisis de suelo para corroborar que se alcanzaron los niveles críticos de cada nutriente.

La dosis de corrección para **nutrientes distintos a N** se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\text{DosisC} = (\text{Sum_Alc} - \text{Sum_Actual}) / \text{fEfic_Nte}$$

donde,

DosisC: dosis corrección del nutriente en estudio (kg ha^{-1}).

Sum_Alc: suministro a alcanzar con la fertilización de corrección, y que corresponde al nivel crítico definido para cada nutriente (mg kg^{-1} P-Olsen para P; mg kg^{-1} K intercambiable para K; mg kg^{-1} S extractable para S).

Sum_Actual: suministro actual evaluado a través de análisis de suelo (mg kg^{-1} P-Olsen para P; mg kg^{-1} K intercambiable para K; mg kg^{-1} S extractable para S).

fEfic_Nte: factor de eficiencia de fertilización de corrección del nutriente en estudio ($\text{mg kg}^{-1}/\text{kg ha}^{-1}$).

En el cálculo de la dosis de fertilización de corrección es indispensable incluir la **eficiencia de la fertilización**, debido a que no todo el fertilizante aplicado quedará disponible para la absorción por el cultivo de arándano. Ello se debe a que: (a) la aplicación de un fertilizante al suelo genera un nuevo equilibrio entre los distintos reservorios del suelo y a través de diferentes procesos, dependiendo de factores que afectan la capacidad de reposición del nutriente a la solución; (b) se producen pérdidas permanentes y/o transitorias de acuerdo al ciclo interno del nutriente en el suelo; (c) las características propias de cada fertilizante determinan la velocidad de entrega de nutrientes; (d) la forma de aplicación del fertilizante (en cobertera, incorporado o localizado; Fig. 3.7) determinan la capacidad de recuperación de las plantas del fertilizante aplicado, debido a la cercanía del fertilizante a las raíces; y (e) la época y parcialización de la fertilización en el caso de nutrientes móviles en el suelo, determinan la magnitud de las pérdidas del fertilizante a través de lixiviación. Todos estos factores explican que solo una parte del fertilizante aplicado en la fertilización sea recuperado por el cultivo.

La eficiencia de fertilización varía dependiendo del nutriente (Cuadro 3.2). Así, en el caso del P y S, dependerá en gran medida de la capacidad de adsorción específica del suelo; y en el caso del K, de la capacidad de adsorción no específica del suelo. Esto implica que a mayor capacidad de adsorción del suelo, menor será la fracción de fertilizante aplicado que quede disponible para la temporada del cultivo.

En el caso de la fertilización fosforada, además, se debe considerar que los parámetros entregados son válidos para fertilizantes solubles (superfosfato triple y normal, fosfatos de amonio, fosfatos potásicos), y no están considerados los fertilizantes semisolubles o parcialmente solubles (fosfatos bicálcicos y rocas fosfóricas).



Figura 3.7. Aplicación de fertilizantes y enmiendas en cobertera en un huerto de arándano.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

En el Cuadro 3.2 se presentan los factores de eficiencia de fertilización para suelos volcánicos, para fertilizaciones de corrección aplicadas en **cobertera** y en una **única dosis**. La clasificación de los suelos de acuerdo a su contenido de Al extractable (acetato de amonio a pH 4,8) permite separarlos según la reactividad del complejo de coloides dominantes de cada grupo de suelo, lo que determina su capacidad de retención de cada nutriente, y por lo tanto, su eficiencia de fertilización. Así, suelos volcánicos con bajos contenidos de Al extractable (150-400 mg kg⁻¹), tales como los “rojo arcillosos”, poseen una menor capacidad de retención de P, y por ende, una mayor eficiencia de fertilización que suelos con altos contenidos de Al extractable (>400 mg kg⁻¹), como los “trumaos”; a pesar de que en ambos suelos, la capacidad de retención está definida por las características de arcillas de carga variable.

Cuadro 3.2. Factores de eficiencia de fertilización para suelos volcánicos con contenidos de Al extractable (Al Ext.) mayores a 150 mg kg⁻¹ y para fertilizaciones de corrección aplicadas en cobertera y en una única dosis.

Grupos de Suelos	Factores de eficiencia (mg kg ⁻¹ /kg ha ⁻¹)		
	<i>fEfic P</i>	<i>fEfic K</i>	<i>fEfic S</i>
150 – 400 mg kg ⁻¹ Al Ext.	0,025	0,240	0,242
400 – 1200 mg kg ⁻¹ Al Ext.	0,020	0,333	0,213
>1200 mg kg ⁻¹ Al Ext.	0,015	0,450	0,170

Fuente: Adaptado de Pinochet (2011)

Es importante recalcar que los factores de eficiencia presentados en el Cuadro 3.2 fueron calculados para una fertilización de corrección aplicada en una **dosis única**. En caso de dosis de fertilización muy elevadas, éstas pueden parcializarse en diferentes años, pero debe considerarse el efecto residual de los fertilizantes, lo que escapa de los objetivos de este manual.

3.3.2 Fertilización de mantención

La fertilización de mantención debe realizarse cuando el nivel de disponibilidad en el suelo es igual o mayor al nivel crítico establecido para cada nutriente y puede realizarse a través de aplicaciones en cobertera o vía fertirriego. Su objetivo es mantener los niveles de disponibilidad de nutrientes en el suelo, reponiendo la extracción de nutrientes en la fruta cosechada y en los residuos de poda (si son extraídos del potrero).

Es una fertilización al suelo que considera la reposición de las pérdidas de nutrientes por extracción del cuartel, por lo que es **innecesario considerar una eficiencia de fertilización** y, además, **no requiere de una época específica de aplicación** durante la temporada de cultivo. Esta intervención se considera pertinente aún con niveles de disponibilidad en el suelo dos hasta tres veces superiores al nivel crítico. Por sobre estos valores, se puede realizar extracción sin reposición, lo que implicará que los niveles nutricionales vayan disminuyendo en el tiempo, haciendo necesario realizar análisis de suelo cada cierto número de años (3 a 4 años) para detectar el momento en que se debe comenzar la aplicación de fertilización de mantención.

Para el diseño de la fertilización de mantención se debe considerar: (a) la cantidad de nutrientes que es exportada desde el huerto en la fruta cosechada, lo que corresponde a una fracción de la demanda anual de nutrientes del cultivo; y (b) la cantidad de nutrientes que es exportada en los residuos de poda, si éstos son retirados del cuartel. De esta forma, la fórmula de cálculo es la siguiente:

$$\text{DosisM} = [(Extr_Nte_Frut) + (Extr_Nte_Poda)] \times fConv$$

donde,

DosisM: dosis de fertilización de mantención (kg ha⁻¹).

Extr_Nte_Frut: extracción del nutriente en estudio en la fruta cosechada (kg ha⁻¹).

Extr_Nte_Poda: extracción del nutriente en estudio en los residuos de poda, si éstos son retirados del cuartel (kg ha⁻¹).

fConv: factor de conversión del elemento a unidad fertilizante (2,3 para P₂O₅; 1,2 para K₂O; 1,4 para CaO; 1,7 para MgO).

La extracción de nutrientes en la fruta se calcula conociendo la demanda anual de nutrientes del cultivo (**Dem_Nte**) y un factor que representa la proporción de esa demanda que es exportada en la fruta producida (**fExtr_Nte_Frut**):

$$\mathbf{Extr_Nte_Frut = (Dem_Nte \times fExtr_Nte_Frut)}$$

donde,

Extr_Nte_Frut: extracción del nutriente en estudio en la fruta cosechada (kg ha⁻¹).

Dem_Nte: demanda anual del nutriente en estudio (kg ha⁻¹).

fExtr_Nte_Frut: factor de extracción del nutriente en estudio en la fruta cosechada (kg kg⁻¹).

En particular, la demanda de nutrientes del huerto corresponde a la necesidad mínima óptima de nutrientes generada por el crecimiento anual de los arbustos, el que está constituido por el crecimiento de sus órganos individuales (brotes, hojas, frutos, raíces e incremento de estructuras permanentes). Se calcula considerando el **rendimiento a alcanzar** de cada temporada y un parámetro integral que se ha denominado **factor de demanda**, que considera la concentración mínima óptima de cada nutriente:

$$\mathbf{Dem_Nte = (Rend_Alcanzar \times fDem_Nte) / fConv}$$

donde,

Dem_Nte: demanda del nutriente en estudio para el crecimiento anual (kg ha⁻¹).

Rend_Alcanzar: rendimiento a alcanzar en la temporada (kg ha⁻¹).

fDem_Nte: factor de demanda del nutriente en estudio (para macronutrientes en g nutriente kg⁻¹ fruta producida; para micronutrientes en mg nutriente kg⁻¹ fruta producida).

fConv: factor de conversión a kg nutriente ha⁻¹ (1.000 para macronutrientes; 1.000.000 para micronutrientes).

El rendimiento a alcanzar (**Rend_Alcanzar**) en cada temporada lleva asociado un cierto crecimiento de estructuras vegetativas. Por ende, la demanda variará a través de las edades productivas del huerto frutal desde la fase de formación, pasando por rendimientos crecientes, hasta llegar a plena producción. En esta última etapa, el huerto alcanza un equilibrio entre la producción de estructuras permanentes (corona y madera estructural) y la poda con objetivos de producción, por lo que también se ha denominado etapa de rendimientos estables. El rendimiento a alcanzar es el rendimiento en fruta diseñado a través del manejo del huerto, considerando sus condiciones edafoclimáticas, un manejo equilibrado de las estructuras reproductivas y vegetativas y un alto nivel tecnológico.

Por su parte, el factor de demanda (**fDem_Nte**) es específico para cada nutriente y expresa la absorción de nutrientes del crecimiento anual, en relación a la producción de fruta del arbusto.

La determinación de los factores de demanda nutricional comprendió el muestreo destructivo de 192 plantas de arándano desde 16 sitios ubicados en las regiones de los Lagos, los Ríos y la Araucanía. Considerando que el objetivo del estudio fue establecer los factores de demanda nutricional del arándano con un manejo óptimo, durante la temporada 2009-10 se realizó una fertilización de corrección con el fin de asegurar una adecuada nutrición de las plantas en estudio. Durante la temporada 2010-11, se muestrearon plantas de los cv. 'Brigitta' y 'Elliot' en tres edades productivas: formación (< 4 años), rendimientos crecientes (4-7 años) y plena producción (> 7 años). Dentro de cada edad productiva, se muestrearon plantas en 4 etapas fenológicas: dormancia, brotación, fruta madura y fin de extensión de brotes. Cada planta se dividió en sus órganos individuales, en los que se determinó peso seco (biomasa) y concentración de nutrientes. Para cuantificar el rendimiento total por planta, se hicieron entre 5 a 7 cosechas parciales por sitio en la medida que los frutos maduraban.

En base a los resultados de los estudios, se determinaron factores de demanda nutricional para plantas en **plena producción** y **rendimientos crecientes**, los que consideran el crecimiento de las estructuras del año y un porcentaje estable de reservas (Cuadros 3.3 y 3.4).

Cuadro 3.3. Factores de demanda para macronutrientes en arándanos cv. 'Elliot' y 'Brigitta' cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.

Nutriente	Factor de demanda (mg kg ⁻¹ fruta fresca)	
	Elliot	Brigitta
Boro (B)	31	24
Cobre (Cu)	12	3,5
Zinc (Zn)	23	10
Manganeso (Mn)	165	113
Hierro (Fe)	87	35

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Los factores de demanda propuestos son constantes dentro de los rangos productivos usuales de la zona sur de Chile, por lo que pueden ser aplicados en huertos con distintas edades productivas, a excepción de la etapa formativa del huerto. De esta forma, la demanda de nutrientes estará directamente relacionada con el rendimiento a alcanzar, como lo resume la ecuación de demanda.

Para los macronutrientes, los factores de demanda no variaron significativamente entre las variedades estudiadas. Por ello, en el presente manual se entrega un valor agronómico único tanto para 'Elliot' como para 'Brigitta'. Por su parte, en los micronutrientes evaluados, los valores obtenidos presentaron diferencias significativas entre variedades, de acuerdo a lo cual se presentan factores de demanda diferenciados para cada variedad (Cuadro 3.4).

Cuadro 3.4. Factores de demanda para micronutrientes en arándanos cv. 'Elliot' y 'Brigitta' cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.

Nutriente	Factor de demanda (mg kg ⁻¹ fruta fresca)	
	Elliot	Brigitta
Boro (B)	31	24
Cobre (Cu)	12	3,5
Zinc (Zn)	23	10
Manganeso (Mn)	165	113
Hierro (Fe)	87	35

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Los factores de demanda nutricional fueron determinados en el estado de máxima acumulación de biomasa de las plantas dentro de la temporada de crecimiento, el cual se registró en el estado fenológico de fruta madura para ambas variedades estudiadas (Fig. 3.8). Así, los factores contabilizan las necesidades nutricionales para alcanzar el máximo crecimiento vegetativo y productivo.

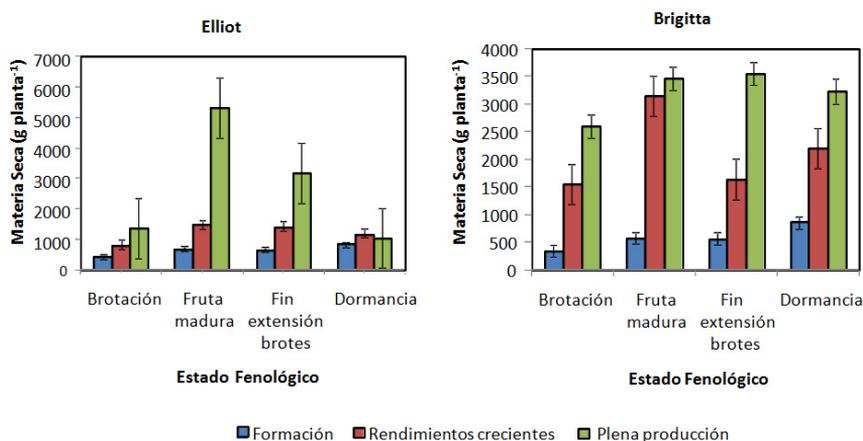


Figura 3.8. Acumulación de biomasa en plantas de arándano cv. 'Brigitta' y 'Elliot' cultivadas en el sur de Chile durante la temporada 2010-11. Valores promedio de 42 plantas.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

El factor de extracción de nutriente en la fruta ($f_{\text{Extr_Nte_Frut}}$) corresponde a la proporción de la demanda nutricional anual que es exportada del huerto al cosechar la fruta y depende del nutriente (Cuadros 3.5 y 3.6). Para los macronutrientes (Cuadro 3.5) no se observaron variaciones significativas entre variedades (Cuadro 3.5). Mientras que para los micronutrientes, se observaron diferencias importantes, por lo que se establecieron factores diferenciados por variedad (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.5. Factores de extracción de macronutrientes en la fruta cosechada de arándanos cv. ‘Elliot’ y ‘Brigitta’ cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.

Macronutriente	Factor extracción en fruta (kg kg ⁻¹)	
	Elliot	Brigitta
Fósforo (P)	0,35	0,40
Potasio (K)	0,40	0,10
Calcio (Ca)	0,10	0,15
Magnesio (Mg)	0,15	

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Cuadro 3.6. Factores de extracción de micronutrientes en la fruta cosechada de arándanos cv. ‘Elliot’ y ‘Brigitta’ cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.

Micronutriente	Factor extracción en fruta (kg kg ⁻¹)	
	Elliot	Brigitta
Boro (B)	0,10	0,15
Cobre (Cu)	0,20	0,35
Zinc (Zn)	0,20	0,30
Manganeso (Mn)	0,10	0,10
Hierro (Fe)	0,10	0,15

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

En el caso que los residuos de poda sean retirados del cuartel, los nutrientes exportados en tales residuos deben considerarse en la dosis de fertilización de mantención. Esta extracción de nutrientes puede calcularse según la siguiente ecuación:

$$Extr_Nte_Poda = (MS_Poda \times fExtr_Nte_Poda) / fConv$$

donde,

Extr_Nte_Poda: extracción del nutriente en estudio en los residuos de poda (kg ha⁻¹).

MS_Poda: peso seco de los residuos de poda (kg ha⁻¹).

fExtr_Nte_Poda: factor de extracción del nutriente en estudio en los residuos de poda (para macronutrientes en g kg⁻¹ peso seco de residuos de poda; para micronutrientes en mg kg⁻¹ peso seco de residuos de poda).

fConv: factor de conversión a kg nutriente ha⁻¹ (1.000 para macronutrientes; 1.000.000 para micronutrientes).

Como referencia, en el Cuadro 3.7 se presentan datos de peso seco de los residuos de poda (*MS_Poda*) para huertos con densidades de plantación entre 3.333 y 4.444 plantas ha⁻¹. Estos datos corresponden a podas de producción con una intensidad promedio y no incluyen podas de rejuvenecimiento. Los valores mayores del rango observado de datos pueden utilizarse en caso de podas más intensas.

Cuadro 3.7. Peso seco de residuos de poda de arándanos cv. ‘Elliot’ y ‘Brigitta’ cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile. Valores promedio de 15 y 12 plantas para la etapa de rendimientos crecientes y plena producción, respectivamente. Valores entre paréntesis corresponden al rango observado de datos.

Etapa productiva	Peso seco de residuos de poda	
	kg planta ⁻¹	kg ha ⁻¹
Rendimientos crecientes	0,8 (0,5-1,2)	3.000 (2.000-4.500)
Plena producción	1,7 (1,5-3,0)	7.500 (5.000-9.000)

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

También es posible hacer una estimación propia del peso de los residuos de poda en cada cuartel. Para esto, se deben pesar los **residuos de poda por planta** en al menos 5 plantas representativas de cada cuartel (Fig. 3.9) y calcular su peso seco, considerando que el porcentaje de materia seca de estos residuos es de alrededor de 50%. Luego, el valor promedio de peso seco por planta se multiplica por el número de plantas por hectárea, obteniéndose el peso seco de residuos de poda por hectárea y cuartel.



Figura 3.9. Pesaje de los residuos de poda para la estimación de la dosis de mantención en huertos de arándano.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Los factores de extracción en los residuos de poda (*fExtr_Nte_Poda*) para macro y micronutrientes, que permiten calcular la extracción de nutrientes en este tipo de residuos, se presentan en el Cuadro 3.8.

Cuadro 3.8. Factores de extracción de nutrientes en los residuos de poda de arándanos cv. 'Elliot' y 'Brigitta' cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile.

Nutriente	Factor extracción de nutriente en residuos de poda
Macronutrientes	g kg⁻¹ peso seco residuos
Fósforo (P)	0,58
Potasio (K)	5,00
Calcio (Ca)	2,58
Magnesio (Mg)	0,36
Micronutrientes	mg kg⁻¹ peso seco residuos
Boro (B)	19,24
Cobre (Cu)	92,30
Zinc (Zn)	23,52
Manganeso (Mn)	295,47
Hierro (Fe)	89,77

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Las dosis de mantención para macronutrientes dependen del rendimiento de fruta y del manejo de los residuos de poda, como se puede observar en los Cuadros 3.9 y 3.10. En general, las dosis de mantención son bajas cuando no se extraen los residuos de poda desde los cuarteles, y por ello, se pueden aplicar a través de la fertirrigación de acuerdo con las necesidades de riego del huerto.

Las dosis de mantención presentadas en los Cuadros 3.9 y 3.10 corresponden a dosis promedio para la zona sur de Chile, las cuales deben ser ratificadas de acuerdo a la experiencia que se vaya construyendo en los distintos huertos. Se espera que después de estas aplicaciones, no se observen aumentos ni disminuciones significativas de los niveles de nutrientes en el análisis de suelo, aunque pueden existir variaciones menores adjudicables al muestreo y a los análisis de laboratorio.

Cuadro 3.9. Dosis de mantención de P, K, Ca y Mg para diferentes niveles de productividad, **sin retiro de residuos de poda** y considerando una densidad de 3.333 plantas ha⁻¹.

Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Dosis de Mantención (kg ha ⁻¹)			
	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
10.000	5	30	4	3
14.000	7	42	5	3
18.000	9	54	7	3
24.000	12	70	9	4

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Cuadro 3.10. Dosis de mantención de P, K, Ca y Mg para diferentes niveles de productividad, considerando el **retiro total de los residuos de poda** y una densidad de 3.333 plantas ha⁻¹.

Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Residuos poda (kg ha ⁻¹)	Dosis de Mantención (kg ha ⁻¹)			
		P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO
10.000	2.700	8	46	14	3
14.000	3.300	11	62	18	5
18.000	4.700	15	82	24	6
24.000	5.700	19	105	30	8

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

3.4 Control de la fertilización mediante el uso del análisis foliar

Una vez realizada la intervención de un huerto frutal a través de la fertilización, el control de ésta intervención debe realizarse evaluando el estado nutricional de las plantas de arándano (análisis foliar), así como también, en el rendimiento y en la calidad de la fruta producida.

El **análisis foliar** es una herramienta de control del estado nutricional del cultivo, permitiendo realizar modificaciones en las dosis de fertilización en la temporada siguiente. Se fundamenta en la relación existente entre la concentración de un nutriente en los tejidos vegetales y el crecimiento y/o producción de las plantas, la que fue establecida por Ulrich (1958) (Fig. 3.10). La base de la interpretación de estos análisis es el concepto de concentración crítica, definida como aquella concentración en la cual el crecimiento o rendimiento se encuentra 5-10% bajo el rendimiento a alcanzar o máximo en el huerto.

La concentración crítica de cada nutriente, asegura una producción cercana al potencial que permite cada condición edafoclimática, cumpliendo además con la calidad exigida en la fruta cosechada. Esto significa que con una concentración menor a la crítica, el frutal muestra una deficiencia y por lo tanto, se ve afectada la producción y/o calidad de la fruta. Por sobre la concentración crítica, no se produce mayor respuesta en rendimiento o en crecimiento, indicando que la planta acumula nutrientes en sus tejidos (consumo de lujo). Mientras que una concentración excesiva, es aquella en la cual se produce un efecto adverso en la producción, ya sea por competencia interna con otros nutrientes o por toxicidad de algún elemento (Fig. 3.10). Por razones prácticas se usa un rango y no un valor puntual de concentración crítica (rango crítico nutriente). Si la concentración de un nutriente se encuentra dentro del rango crítico, se estima que ese nutriente no es un factor limitante para el crecimiento o rendimiento.

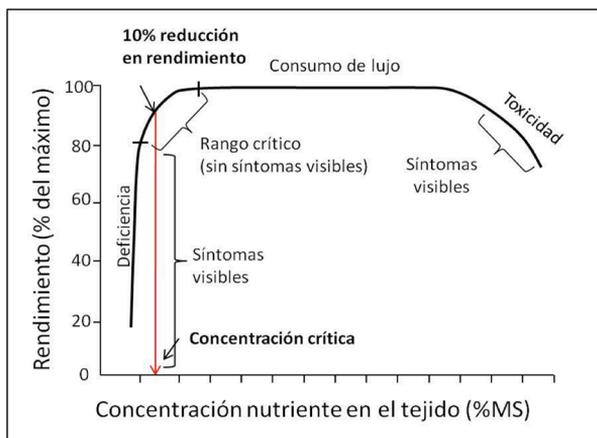


Figura 3.10. Relación general entre la concentración de un nutriente en los tejidos vegetales y el rendimiento en términos relativos del cultivo o frutal.

Fuente: Adaptado de Havlin et al. (2005)

Por otra parte, la edad fisiológica de la planta o del tejido vegetal es el factor más importante que afecta la variación de la concentración de un nutriente en la planta. Con la edad se produce una disminución en el nivel de la mayoría de los nutrientes minerales (excepto nutrientes inmóviles). Por lo tanto, el muestreo foliar debe realizarse en un estado fisiológico específico, en que el tejido foliar manifiesta cierta estabilidad en los contenidos nutricionales y da cuenta de las diferencias en la concentración foliar en relación con la tasa de crecimiento de las plantas. De este modo, para cada especie frutal existe una época recomendada para el muestreo del tejido foliar.

En resumen, el correcto uso del análisis foliar requiere de la comparación de sus resultados con **estándares originados en zonas edafoclimáticas similares, para muestras colectadas en épocas similares**. De lo contrario, se pueden generar problemas nutricionales que significan pérdidas económicas por rendimientos limitados, baja calidad de la fruta y/o disminución de la vida productiva de las plantas. En este contexto, el Proyecto FIA PYT 2009-0080 ajustó los estándares foliares y las fechas de muestreo foliar para arándanos de la variedad 'Elliot' y 'Brigitta' cultivados en suelos volcánicos de la zona sur de Chile, a través de ensayos en cinco huertos ubicados entre las regiones de los Lagos y de los Ríos, los que fueron evaluados durante dos temporadas (2009-10 y 2010-11).

3.4.1 Estándares nutricionales y fechas de muestreo foliar para arándanos cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile

El monitoreo periódico de las concentraciones foliares de los nutrientes N, P, K, Ca, Mg y S durante dos temporadas (2009-10 y 2010-11), permitió establecer que la época de muestreo foliar actualmente utilizada (enero-febrero) no es completamente adecuada para las condiciones de producción del sur de Chile, ya que no tuvo la sensibilidad suficiente para discriminar huertos con niveles deficientes y suficientes de nutrientes en el suelo.

Además, los resultados de los ensayos permitieron comprobar que los estándares nutricionales usados actualmente en huertos de la zona sur de Chile (que provienen de USA) tampoco son adecuados, ya que en las fechas de muestreo foliar actualmente recomendadas, no permitieron diferenciar el estado nutricional de plantas cultivadas en suelos con un amplio rango de disponibilidad de distintos nutrientes esenciales. Por ejemplo, para N y P, las plantas serían catalogadas como deficientes, a pesar de provenir de suelos con niveles de N disponible entre 10 y 100 ppm, y de P-Olsen entre 5 y 35 ppm (Fig. 3.11).

La **concentración de N foliar** mostró una disminución desde cuaja hasta poscosecha durante las dos temporadas evaluadas, debido a la movilización del elemento en la planta (Fig. 3.11). La concentración de N foliar difirió estadísticamente entre plantas cultivadas en suelos con niveles altos y bajos de disponibilidad de N solo en los muestreos realizados entre **mediados de noviembre y mediados de diciembre** (Fig. 3.11). En ese período de muestreo, el rango normal de la concentración de N foliar sería **1,8–2,2%**, y concentraciones superiores a 2,2% N estarían reflejando un exceso de N.

Para el caso del **P**, se observó una disminución de la concentración foliar en el tiempo en ambas temporadas, al igual que para el caso del N. Se observaron diferencias significativas entre plantas de ensayos con niveles deficientes y suficientes de P en el suelo en las últimas dos fechas de muestreo realizadas entre **principios de marzo y mediados de abril**, es decir, en poscosecha (Fig. 3.11). En ese período de muestreo, el rango normal de la concentración de P foliar sería 0,07–0,08 %.

Por su parte, la concentración de **K** foliar mostró una amplia variación en el período de evaluación. Se recomienda hacer el muestreo foliar entre **principios de marzo y mediados de abril**, al igual que en el caso del P, para que el muestreo sea útil para el análisis de varios elementos a la vez (Fig. 3.11). El rango normal de concentración de K foliar para la época de muestreo recomendada sería 0,55-0,80 %.

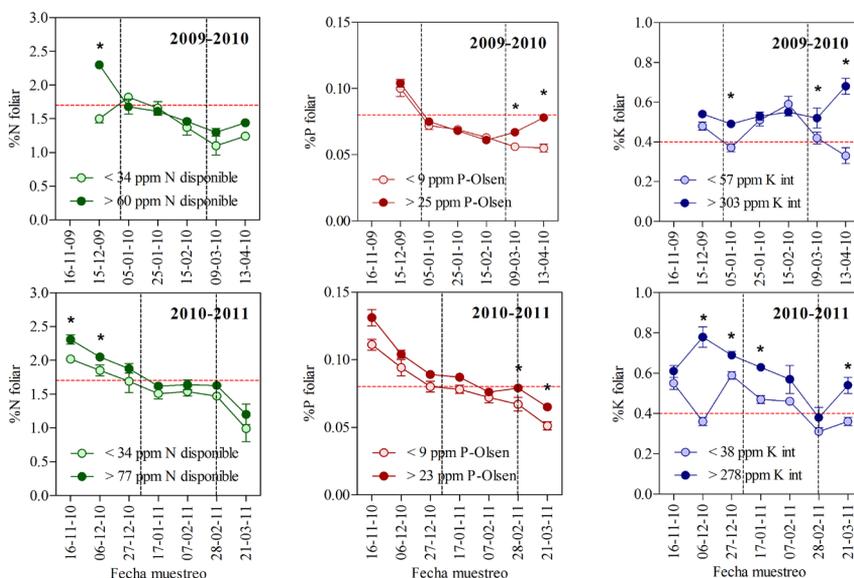


Figura 3.11. Variación de la concentración foliar (%) de macronutrientes primarios (N, P y K) en muestras foliares de arándanos cultivados en el sur de Chile durante las temporadas 2009-10 y 2010-11. Valores promedio para variedades ‘Elliot’ y ‘Brigitta’.

La línea punteada roja indica el límite inferior del rango normal de concentración foliar de cada nutriente, según Hanson y Hancock (1996).

Las líneas punteadas paralelas indican el período de tiempo actualmente utilizado para el muestreo foliar en el sur de Chile.

El asterisco indica diferencias significativas entre sitios dentro de una misma fecha de muestreo (Test Tukey; $p \leq 0,05$).

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

En el caso de **Ca** y **Mg**, se recomienda hacer el muestreo foliar en poscosecha (mediados de marzo a mediados de abril) (Fig. 3.12), al igual que para P y K. El rango normal de concentración foliar en esa fecha sería de 0,40–0,60% para Ca y de 0,09–0,14 % para Mg. En cambio, para S, la fecha recomendada sería inicios de la temporada (mediados de noviembre a mediados de diciembre) (Fig. 3.12), al igual que para N. Su rango normal de concentración foliar sería 0,09–0,20 %.

En el caso particular del **Ca**, la concentración foliar aumentó durante la temporada (Fig. 3.12), en concordancia con su estatus de nutriente inmóvil dentro de la planta. En las fechas de muestreo en que el análisis foliar mostró diferencias significativas, las plantas de sitios con menor disponibilidad de Ca ($< 0,7 \text{ cmol}_+ \text{kg}^{-1}$) tuvieron una mayor concentración de Ca foliar que plantas de sitios con mayor disponibilidad de Ca ($> 4 \text{ cmol}_+ \text{kg}^{-1}$) (Fig. 3.12). Probablemente, plantas cultivadas en suelos deficientes en Ca tuvieron una restricción en su producción de biomasa, por lo que el Ca absorbido fue concentrado en los tejidos vegetales.

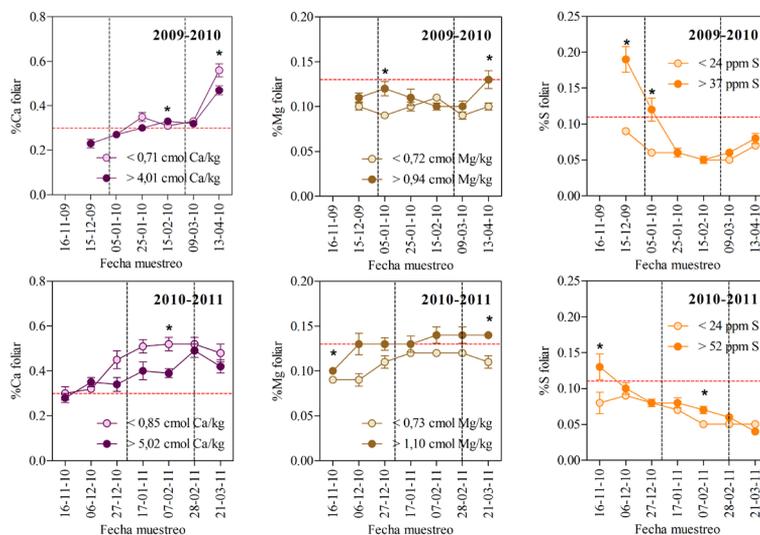


Figura 3.12. Variación de la concentración foliar (%) de macronutrientes secundarios (Ca, Mg y S) en muestras foliares de arándanos cultivados en el sur de Chile durante las temporadas 2009-10 y 2010-11. Valores promedio para variedades ‘Elliot’ y ‘Brigitta’.

La línea punteada roja indica el límite inferior del rango normal de concentración foliar de cada nutriente, según Hanson y Hancock (1996).

Las líneas punteadas paralelas indican el período de tiempo actualmente utilizado para el muestreo foliar en el sur de Chile.

El asterico indica diferencias significativas entre sitios dentro de una misma fecha de muestreo (Test Tukey; $p \leq 0,05$).

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

En el Cuadro 3.11 se presenta un resumen de los rangos normales de concentración foliar y fechas de muestreo recomendadas para arándanos de las variedades ‘Elliot’ y ‘Brigitta’ cultivados en agroecosistemas del sur de Chile. Para mayor información acerca del elemento tóxico Al, ver capítulo 5.

Cuadro 3.11. Estándares foliares y fechas de muestreo recomendadas para el cultivo del arándano en agroecosistemas del sur de Chile.

Elemento	Rango normal	Fecha muestreo
Nitrógeno (N)	1,80-2,20 %	15 noviembre-15 diciembre
Fósforo (P)	0,07-0,08 %	15 marzo-15 abril
Potasio (K)	0,55-0,80 %	15 marzo-15 abril
Calcio (Ca)	0,40-0,60 %	15 marzo -15 abril
Magnesio (Mg)	0,09-0,14 %	15 marzo-15 abril
Azufre (S)	0,09-0,20 %	15 noviembre-15 diciembre
Aluminio (Al)	< 60 mg kg ⁻¹	15 noviembre-15 diciembre

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Es importante señalar que para que los análisis foliares sean comparables a los estándares definidos por el Proyecto FIA PYT 2009-0080, la pauta de muestreo foliar debe incluir las siguientes recomendaciones:

- Definir unidades homogéneas de muestreo (similar tipo de suelo, manejo, variedad, edad y otros pertinentes). Generalmente corresponde a un cuartel del huerto.
- En cada unidad homogénea, muestrear 8-10 plantas representativas, sin síntomas de enfermedades.
- Las hojas deben ser colectadas desde la sección media de brotes normales mayores a 20 cm de largo (Fig. 3.13).
- Colectar al menos 10 hojas por planta a diferentes alturas dentro de la misma.
- Cada muestra foliar debe ingresarse al laboratorio en una bolsa de papel rotulada con linformación correspondiente al huerto y cuartel específico y los análisis solicitados (Fig. 3.13).
- La muestra debe ser enviada lo antes posible al laboratorio y no debe ser expuesta al sol directo o a fuentes de calor.



Figura 3.13. Detalle del proceso de muestreo foliar.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

3.5 Ejemplos de cálculo de las dosis de fertilización

A continuación se presentan ejemplos de cálculo de las dosis de fertilización de corrección y mantención para nutrientes distintos al N, en base a un análisis de suelo real (Cuadro 3.12).

3.5.1 Interpretación del análisis de suelo

En el Cuadro 3.12 se presentan un análisis de suelo de un cuartel de 3,5 hectáreas de arándano cv 'Elliot' de 6 años de edad. El resultado analítico se comparó con los niveles críticos determinados para cada nutriente (Cuadro 3.1), lo que definió el tipo de fertilización a realizar en cada caso (Corrección o Mantención) o la posibilidad de realizar una extracción sin reposición (Extr. sin rep.) con un monitoreo periódico de los niveles de nutrientes en el suelo a través de análisis de suelo.

Cuadro 3.12. Análisis de suelo entregado por el Laboratorio de Suelos de la UACH.

IDENTIFICACION DE POTRERO(S)				
Potrero:				
Tipo suelo:	Trumao			
Profundidad :	0-20 (cm)			
Superficie:	3,5 (ha)			
Uso actual del Suelo: Arándanos 'Elliot'				
RESULTADOS ANALITICOS			Valor	
pH	en agua (1:2,5)		5,6	
pH	CaCl ₂ (0,01M) (1:2,5)		5,1	
Materia Orgánica	Walkley-Black (%)		17,6	
Aluminio extractable	Ac. Amonio pH 4,8 (mg/kg)		780	
N mineral	(mg/kg)		16,7	
Fósforo	Olsen (mg/kg)		10,4	Corrección
Potasio	intercambiable (mg/kg)		82	Corrección
Sodio	intercambiable (cmol ₊ /kg)		0,08	
Calcio	intercambiable (cmol ₊ /kg)		4,01	Extr. sin rep.
Magnesio	intercambiable (cmol ₊ /kg)		0,64	Mantención
Suma de bases	Intercambiables (cmol ₊ /kg)		4,94	
Aluminio	intercambiable (cmol ₊ /kg)		0,09	
CICE	(cmol ₊ /kg)		5,04	
Saturación de Aluminio	(%)		1,11	
Azufre	Disponible (mg/kg)		37,1	Extr. sin rep.
Boro	Disponible (mg/kg)		0,53	
Zinc	Disponible (mg/kg)		1,11	

3.5.2 Ejemplos de cálculo de la dosis de corrección

A continuación se presentan ejemplos de cálculo de la dosis de fertilización de corrección de P y K para un cuartel de 3,5 hectáreas de arándano cv 'Elliot' de 6 años de edad, sobre un suelo trumao con un contenido de Al extractable de 780 mg kg⁻¹ (Cuadro 3.12).

EJEMPLO 1

Nutriente= Fósforo (P)	
Suministro actual= 10,4 ppm P-Olsen	(Análisis suelo)
Suministro requerido= 16 ppm P-Olsen	(Cuadro 3.1)
Al extractable= 780 mg kg ⁻¹	(Análisis suelo)
Factor Eficiencia P= 0,02 mg kg ⁻¹ /kg ha ⁻¹	(Cuadro 3.2)

$$DosisC = (Sum_Alc - Sum_Actual) / fEfic_P$$

$$DosisC = (16 - 10,4) / 0,02$$

$$DosisC = 280 \text{ kg P ha}^{-1} \times 2,29$$

$$DosisC = 641 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$$

$$DosisC = 641 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \times 3,5 \text{ ha}$$

$$DosisC = 2.244 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ para el cuartel completo}$$

EJEMPLO 2

Nutriente= Potasio (K)	
Suministro actual= 82 ppm K intercambiable	(Análisis suelo)
Suministro requerido= 100 ppm K intercambiable	(Cuadro 3.1)
Al extractable= 780 mg kg ⁻¹	(Análisis suelo)
Factor Eficiencia P= 0,333 mg kg ⁻¹ /kg ha ⁻¹	(Cuadro 3.2)

$$DosisC = (Sum_Alc - Sum_Actual) / fEfic_K$$

$$DosisC = (100 - 82) / 0,333$$

$$DosisC = 54 \text{ kg K ha}^{-1} \times 1,2$$

$$DosisC = 65 \text{ K}_2\text{O ha}^{-1}$$

$$DosisC = 65 \text{ K}_2\text{O ha}^{-1} \times 3,5 \text{ ha}$$

$$DosisC = 228 \text{ kg K}_2\text{O para el cuartel completo}$$

Las dosis de corrección calculadas según el modelo propuesto consideran un período de aplicación de una temporada. Durante la temporada de corrección, se debe sumar la dosis de mantención a la dosis de corrección. Una vez que se ha alcanzado el nivel crítico de cada nutriente, debidamente ratificado por un análisis de suelo, solo es necesaria la aplicación anual de las dosis de mantención.

3.5.3 Ejemplos de cálculo de la dosis de mantención

Estos ejemplos se hicieron para el mismo cuartel de 3,5 hectáreas de arándano cv 'Elliot' de 6 años de edad con una proyección de rendimiento de 15 t ha⁻¹. En la poda realizada durante el invierno pasado, se registró un peso fresco de poda de 3,0 kg planta⁻¹ lo que equivale a 1,5 kg peso seco planta⁻¹, considerando un % materia seca (MS) de 50% en los residuos de poda. Tomando en cuenta el retiro de aproximadamente 50% de los restos de poda y la densidad de plantación del cuartel (3.333 plantas ha⁻¹), la materia seca exportada del cuartel en la última poda fue de 2.500 kg MS ha⁻¹.

EJEMPLO 3

Nutriente= **Fósforo (P)**

Densidad plantación = 3.333 plantas ha⁻¹

Rendimiento a alcanzar = 15 t ha⁻¹ = 15.000 kg ha⁻¹ = 4,5 kg planta⁻¹

a) Cálculo de extracción de P en fruta (*Extr_P_Frut*)

Factor de demanda P = 0,6 g P kg⁻¹ fruta fresca (Cuadro 3.3)

Factor extracción P en fruta = 0,35 kg kg⁻¹ (Cuadro 3.5)

$$Dem_P = (Rend_Alcanzar \times fDem_P) / fConv$$

$$Dem_P = (15.000 \times 0,6) / 1.000$$

$$Dem_P = 9 \text{ kg P ha}^{-1}$$

$$Extr_P_Frut = (Dem_P \times fExtr_P_Frut)$$

$$Extr_P_Frut = (9 \times 0,35)$$

$$Extr_P_Frut = 3 \text{ kg P ha}^{-1}$$

b) Cálculo de extracción de P en material de poda (*Extr_P_Poda*)

Materia seca última poda = 2.500 kg ha⁻¹ (Registros huerto)

Factor extracción P poda = 0,58 g P kg⁻¹ peso seco residuos (Cuadro 3.8)

$$Extr_P_Poda = (MS_Poda \times fExtr_P_Poda) / fConv$$

$$Extr_P_Poda = (2.500 \times 0,58) / 1.000$$

$$Extr_P_Poda = 1,5 \text{ kg P ha}^{-1}$$

c) Cálculo de dosis de mantención de P (*DosisM*)

$$DosisM = [(Extr_P_Frut) + (Extr_P_Poda)] \times fConv$$

$$DosisM = [3 + 1,5] \times 2,29$$

$$DosisM = 10 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1}$$

$$DosisM = 10 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ ha}^{-1} \times 3,5 \text{ ha}$$

$$DosisM = 35 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ para el cuartel completo}$$

EJEMPLO 4

Nutriente= **Potasio (K)**

Densidad plantación = 3.333 plantas ha⁻¹

Rendimiento a alcanzar = 15 t ha⁻¹ = 15.000 kg ha⁻¹ = 4,5 kg planta⁻¹

a) Cálculo de extracción de K en fruta (*Extr_K_Frut*)

Factor de demanda K = 6,2 g K kg⁻¹ fruta fresca (Cuadro 3.3)

Factor extracción K en fruta = 0,40 kg kg⁻¹ (Cuadro 3.5)

$$Dem_K = (Rend_Alcanzar \times fDem_K) / fConv$$

$$Dem_K = (15.000 \times 6,2) / 1.000$$

$$Dem_K = 93 \text{ kg K ha}^{-1}$$

$$Extr_K_Frut = (Dem_K \times fExtr_K_Frut)$$

$$Extr_K_Frut = (93 \times 0,40)$$

$$Extr_K_Frut = 37 \text{ kg K ha}^{-1}$$

b) Cálculo de extracción de K en material de poda (*Extr_K_Poda*)

Materia seca última poda = 2.500 kg ha⁻¹ (Registros huerto)

Factor extracción K poda = 5,0 g K kg⁻¹ peso seco residuos (Cuadro 3.8)

$$Extr_K_Poda = (MS_Poda \times fExtr_K_Poda) / fConv$$

$$Extr_K_Poda = (2.500 \times 5,0) / 1.000$$

$$Extr_K_Poda = 13 \text{ kg K ha}^{-1}$$

c) Cálculo de dosis de mantención de K (*DosisM*)

$$DosisM = [(Extr_K_Frut) + (Extr_K_Poda)] \times fConv$$

$$DosisM = [37 + 13] \times 1,2$$

$$DosisM = 60 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$$

$$DosisM = 60 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1} \times 3,5 \text{ ha}$$

$$DosisM = 210 \text{ kg K}_2\text{O para el cuartel completo}$$

EJEMPLO 5

Nutriente= **Magnesio (Mg)**

Densidad plantación = 3.333 plantas ha⁻¹

Rendimiento a alcanzar = 15 t ha⁻¹ = 15.000 kg ha⁻¹ = 4,5 kg planta⁻¹

a) Cálculo de extracción de Mg en fruta (*Extr_Mg_Frut*)

Factor de demanda Mg = 0,7 g Mg kg⁻¹ fruta fresca (Cuadro 3.3)

Factor extracción Mg en fruta = 0,15 kg kg⁻¹ (Cuadro 3.5)

$$Dem_Mg = (Rend_Alcanzar \times fDem_Mg) / fConv$$

$$Dem_Mg = (15.000 \times 0,7) / 1.000$$

$$Dem_Mg = 11 \text{ kg Mg ha}^{-1}$$

$$Extr_Mg_Frut = (Dem_Mg \times fExtr_Mg_Frut)$$

$$Extr_Mg_Frut = (11 \times 0,15)$$

$$Extr_Mg_Frut = 2 \text{ kg Mg ha}^{-1}$$

b) Cálculo de extracción de Mg en material de poda (*Extr_Mg_Poda*)

Materia seca última poda = 2.500 kg ha⁻¹ (Registros huerto)

Factor extracción Mg poda = 0,36 g kg⁻¹ peso seco residuos (Cuadro 3.8)

c) Cálculo de dosis de mantención de Mg (*DosisM*)

$$DosisM = [(Extr_Mg_Frut) + (Extr_Mg_Poda)] \times fConv$$

$$DosisM = [2 + 1] \times 1,7$$

$$DosisM = 5 \text{ kg MgO ha}^{-1}$$

$$DosisM = 5 \text{ kg MgO ha}^{-1} \times 3,5 \text{ ha}$$

$$DosisM = 18 \text{ kg MgO para el cuartel completo}$$

Es importante recalcar que las dosis de mantención deben ser ajustadas anualmente, de acuerdo al rendimiento esperado de cada cuartel y a la intensidad de poda y porcentaje de retiro de los restos de poda desde el cuartel.

Literatura consultada

- Bernier, R. 1999. Análisis de suelo. Metodología e interpretación. En: Curso de Capacitación para Operadores del Programa de Recuperación de Suelos Degradados INDAP Décima Región. Bernier, R. (Ed.). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Remehue. Osorno, Chile. <http://es.scribd.com/doc/62534486/Curso-de-capacitacion-para-operadores-recuperacion-de-suelos-degradados> (consultado el 21 de Octubre de 2013).
- Fuqua, B., Byers, P., Kaps, M., Kovacs, L., Waldstein, D. 2005. Growing Blueberries in Missouri. Bulletin 44. Missouri State University, Mountain Grove, Missouri. <http://mtngvr.missouristate.edu/assets/publications/B44GrowingBlueberries.pdf> (consultado el 21 de Agosto de 2013).
- Hart, J., Strik, B., White, L., Yang, W. 2006. Nutrient Management for Blueberries in Oregon. Nutrient management guide. Oregon State University, Corvallis, Oregon. <http://scholarsarchive.library.oregonstate.edu/xmlui/bitstream/handle/1957/20444/em8918.pdf?sequence=1> (consultado el 12 de Agosto de 2013).
- Hanson E., Hancock, J. 1996. Managing the Nutrition of Highbush Blueberries. Bulletin E-2011. Michigan State University Extension, East Lansing, Michigan.
- Havlin, J., Beaton, J., Tisdale, S., Nelson, W. 2005. Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to nutrient management. Pearson Prentice Hall. New Jersey, USA.
- Pinochet, D., Maraboli, A., Artacho, P., y Toro, M. 2012. Estándares foliares para el arándano alto (*Vaccinium corymbosum* L.), cultivado en suelos volcánicos del sur de Chile. Libro resumen 63º Congreso Agronómico. Temuco, Chile.
- Pinochet, D. 2011. Guía para la fertilización de cultivos brásicas forrajeras. En: Cultivo y utilización de brásicas forrajeras en la Patagonia Húmeda (Aysén). Hepp, C. (Ed.). Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Coyhaique, Chile. pp 33-49.
- Rodríguez, J., Pinochet, D., Matus, F. 2001. Fertilización de los Cultivos. LOM Ediciones. Santiago, Chile.
- Rodríguez, J. 1993. La fertilización de los cultivos: un método racional. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.
- Silva, H., Rodríguez, J. 1995. Fertilización de Plantaciones Frutales. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

CAPITULO 4

FERTILIZACION NITROGENADA: UN CASO ESPECIAL

4.1 Antecedentes generales

La fertilización N a través de la aplicación de fertilizantes minerales es considerada un caso especial, dado que el N en forma mineral (amonio y nitrato) no se acumula en los suelos y la construcción de la fertilidad del N en el suelo solo se puede realizar a través de la acumulación de N en formas orgánicas. Específicamente, la fertilidad nitrogenada del suelo se construye a través de la acumulación de materia orgánica descomponible, la que presenta ciclos relativamente cortos en el suelo y obedientes al ingreso de residuos orgánicos. Por lo tanto, todo exceso de N mineral en el suelo, se perderá hacia las aguas o el aire y, en muchos casos, puede causar toxicidad en el cultivo y efectos adversos para su crecimiento.

Además, en el caso del N, no se puede hablar de fertilización de mantención, sino más bien de una fertilización anual de producción, cuyo objetivo es suplementar el suministro de N del suelo, para satisfacer la demanda de N del cultivo. Para ello, se deben utilizar todas las herramientas posibles, de forma que la fertilización N cumpla con los requisitos de alcanzar y asegurar la máxima productividad del huerto, con un crecimiento vegetativo armónico de las plantas y con un mínimo riesgo de contaminación y/o toxicidad para el cultivo.

La dosis de N se calcula en base a la siguiente ecuación (Silva y Rodríguez, 1995):

$$\text{Dosis}_N = (\text{Dem}_N - \text{Sum}_N) / \text{Efic}_{FN}$$

donde,

Dosis_N: dosis de producción de N (kg N ha⁻¹).

Dem_N: demanda de N para el crecimiento anual (kg N ha⁻¹).

Sum_N: suministro de N del suelo (kg N ha⁻¹).

Efic_{FN}: eficiencia de la fertilización N (kg kg⁻¹).

Esta dosis también puede ser calculada en base a una planta individual (g N planta⁻¹), la que puede ser convertida a una dosis por hectárea, conociendo el número de plantas por hectárea del cuartel. Esto se debe tener en consideración, ya que las densidades de plantación de los huertos pueden ser variables.

4.2 Demanda de Nitrógeno del arándano

Tal como fue señalado en el Capítulo 3, Sección 3.3.2, la demanda de nutrientes, y por lo tanto, la demanda de N del cultivo del arándano, se definen en base a la productividad a alcanzar (**Rend_Alcanzar**), de acuerdo con un manejo equilibrado de las estructuras vegetativas y reproductivas de las plantas del huerto. Por lo tanto, es indispensable estimar la cantidad de yemas que se requiere dejar con la poda para la alcanzar un rendimiento que cumpla con un equilibrio de la biomasa de las unidades de fuente (brotes y hojas) y de destino (frutos) de carbono en las plantas. Esto es, la biomasa de hojas requerida para sustentar la productividad de fruta y nueva madera frutal durante el período de crecimiento. También, se debe considerar el factor de demanda de N (**fDem_N**), parámetro que expresa la absorción de N del crecimiento anual en relación a la producción de fruta.

$$Dem_N = (Rend_Alcanzar \times fDem_N) / fConv$$

donde,

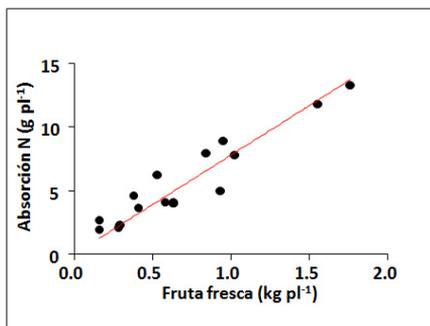
Dem_N: demanda de N para el crecimiento anual (kg N ha⁻¹).

Rend_Alcanzar: rendimiento a alcanzar en la temporada (kg ha⁻¹).

fDem_N: factor de demanda de N (g N kg⁻¹ fruta producida).

fConv: factor de conversión a kg nutriente ha⁻¹ (1.000).

El factor de demanda de N para arándanos fue determinado de la misma forma que para el resto de los nutrientes (ver Capítulo 3, sección 3.3.2). Este factor corresponde a una relación entre la absorción de N mínima necesaria para obtener el crecimiento aéreo anual del arbusto (hojas, brotes y frutos), y la producción de fruta. Esta relación fue lineal e independiente de la variedad estudiada (Figura 4.1), cuando se consideró un manejo equilibrado de las plantas, es decir, plantas con proporciones equilibradas de fruta, brotes y hojas.



Parámetros ecuación	Variedad		
	Elliot	Brigitta	Ambos
a (g kg ⁻¹)	7,68	7,92	7,81
b	0	0	0
R ²	0,94	0,77	0,88
Sy.x	0,90	1,54	1,18

Figura 4.1. Relación entre la fruta producida y la absorción de N en el crecimiento aéreo anual de plantas de arándano cv. 'Brigitta' y 'Elliot', creciendo en agroecosistemas de la zona sur de Chile.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

El factor de demanda de N para arándanos cultivados en el sur de Chile corresponde a **7,8 g N kg⁻¹ fruta fresca**, valor que puede ser utilizado indistintamente tanto para la variedad 'Elliot' como para 'Brigitta'. Además, en la Fig. 4.1 se observa que existe un error estándar de la regresión ($S_{y.x}$) de alrededor 1,18 g N kg⁻¹ fruta fresca, lo que representa un error del 15% en el valor propuesto como factor de demanda de N.

En la estimación de la demanda de N del cultivo, también es determinante el rendimiento a alcanzar, el que debe ajustarse según la curva de crecimiento del huerto, las condiciones edafoclimáticas de cada temporada, y el manejo del huerto. Es decir, variaciones en el rendimiento debido a manejo de heladas, polinización y control de enfermedades y plagas, entre otros, deben ser consideradas al momento del diseño de la fertilización N.

4.3 Suministro de Nitrógeno del suelo

El suministro de N corresponde a la cantidad de N que el arbusto puede absorber desde el suelo sin adición de fertilizantes nitrogenados (Rodríguez et al., 2001). Esto corresponde al N en forma mineral (amonio y nitrato) proveniente de la mineralización de fuentes orgánicas del suelo con potencial de descomposición ("N potencialmente mineralizable"). Así, el suministro de N del suelo está constituido por el N-mineral originado de la mineralización del N orgánico del suelo, y que ha pasado a la solución del suelo durante la estación de crecimiento. En el suministro de N, también debe considerarse la habilidad de las plantas de arándano para recuperar el N disponible desde la zona de exploración de las raíces, lo que se resume en los conceptos de "sinlocación" y "sincronía". La "sinlocación" se refiere a la capacidad de las raíces de explorar el volumen de suelo donde se localizan los nutrientes (en este caso N mineral) y que está definida por la densidad radical. Mientras que la "sincronía" se refiere a la concordancia temporal del crecimiento y actividad de raíces y las tasas de mineralización del N del suelo.

En resumen, el N disponible durante la estación de crecimiento está determinado por la dinámica interna de este nutriente en el suelo, la que es dominada por la mineralización del "N orgánico potencialmente mineralizable", como se ha denominado a la forma orgánica en la cual el N se acumula en el suelo. Este tipo de N corresponde a la fracción lábil del N orgánico del suelo y se ha demostrado que obedece al historial de manejo de los residuos orgánicos en el suelo (Sierra y Rodríguez, 1986).

El N inmediatamente disponible en el suelo para las plantas, puede ser estimado a través de la medición del N-mineral del suelo. Sin embargo, el N-mineral es un indicador que debe ser considerado con cuidado, debido a que puede perderse del suelo con facilidad, a través de su incorporación a formas orgánicas (inmovilización microbial) y/o a través de la desnitrificación o de la lixiviación, que corresponden a pérdidas permanentes del sistema.

Estos últimos dos procesos de pérdida ocurren mayoritariamente con presencia de nitratos en el suelo; forma de N-mineral que sería menos frecuente en suelos donde se cultiva el arándano, los que debido a sus condiciones ácidas determinarían que la forma de N-mineral dominante sea amonio.

En este contexto, el Proyecto FIA PYT 2009-0080 evaluó la dinámica temporal de la disponibilidad de N-mineral (sin aplicación de fertilizante nitrogenado) en dos profundidades de suelo (0-20 y 0-40 cm), con el objetivo de evaluar la capacidad predictiva de este indicador en suelos volcánicos. Estas mediciones se hicieron durante dos temporadas (2009-10 y 2010-11) en seis cuarteles de cinco huertos comerciales de las regiones de los Ríos y los Lagos (Fig. 4.2).

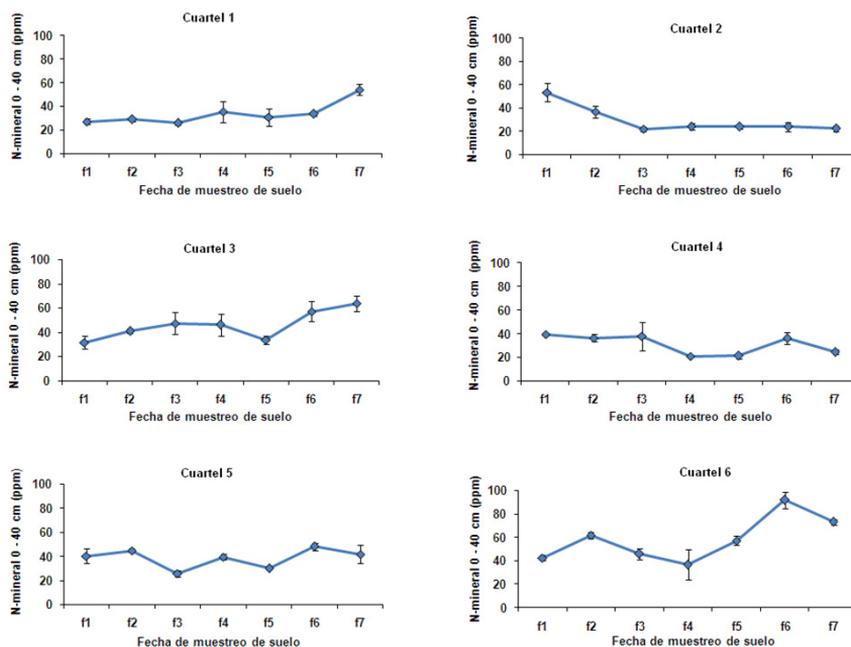


Figura 4.2. Evolución temporal de N-mineral a 0-40 cm de profundidad en suelos volcánicos cultivados con arándanos, durante el período comprendido entre brotación y caída de hojas. Temporada 2010-2011.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

En la Fig. 4.2 se observa que existió una tendencia del N-mineral del suelo a mantenerse relativamente constante durante el período de crecimiento de los arándanos, a pesar de las pérdidas y la absorción de N por las plantas. Esta tendencia se debería, por una parte, a que las pérdidas producidas durante la temporada serían repuestas por la mineralización del N orgánico del suelo; y por otra parte, a que el resultado primario de la mineralización del N orgánico es amonio (NH_4^+) y esta forma de N tendría mayor permanencia en el suelo que el N en forma de nitrato (NO_3^-).

Las principales salidas de N-mineral en los suelos volcánicos cultivados con arándanos corresponderían a la inmovilización y la absorción por las plantas y, en menor medida, a desnitrificación y lixiviación, dado que en estos sistemas productivos el manejo del riego es caracterizado por el uso de riego por goteo. Esto determinaría que las posibilidades de exceso de agua y de condiciones anaeróbicas en el suelo sean poco frecuentes durante la temporada de crecimiento, principalmente durante el verano. Bajo estas condiciones, no es extraño que la disponibilidad de N-mineral se mantenga relativamente constante en el suelo, como lo muestran los datos de nuestros ensayos (Fig. 4.2).

Los resultados descritos en la Fig. 4.2 sugieren que la medición del **N-mineral presente en el suelo a inicios de la temporada** puede considerarse como un indicador del N inmediatamente disponible para el cultivo del arándano en suelos volcánicos, y correspondería al N-mineral que ha quedado en el suelo después del período invernal.

Considerando lo anterior, este manual propone que la estimación del suministro de N del suelo para arándanos debe considerar: el N-mineral medido a inicios de temporada; el N-mineral proveniente de la mineralización del N “potencialmente mineralizable” durante la temporada de crecimiento; y además, debe incluir la eficiencia de las plantas de arándano para recuperar el N-mineral del suelo en el volumen de absorción del suelo.

$$Sum_N = (ppm_Nmin_{0-40} \times Dap \times fAbs_N) + fSN$$

donde,

Sum_N: suministro de N del suelo (kg N ha⁻¹).

ppm_Nmin₀₋₄₀: disponibilidad de N-mineral en el suelo medido a inicios de la temporada de cultivo y a 0-40 cm de profundidad (ppm o mg kg⁻¹).

Dap: densidad aparente del suelo (g cm⁻³).

fAbs_N: factor de eficiencia de absorción de N del arándano en la profundidad 0-40 cm; su valor en nuestros experimentos fue estimado en 3,5 dm kg kg⁻¹.

fSN: factor de suministro de N que contabiliza el N mineralizado desde el N “potencialmente mineralizable” del suelo durante la temporada de crecimiento del arándano (kg N ha⁻¹).

Considerando que, generalmente, los análisis de suelo se realizan en muestras de suelo obtenidas a 0-20 cm de profundidad, la disponibilidad de N-mineral a 0-40 cm (*ppm_Nmin₀₋₄₀*) puede ser calculada a partir del análisis de N-mineral a 0-20 cm, de acuerdo a la siguiente aproximación, basada en la relación encontrada entre las mediciones de N-mineral a 0-20 cm y a 0-40 cm de profundidad en suelos volcánicos (Sección 3.2.1; Fig. 3.5):

$$ppm_Nmin_{0-40} = ppm_Nmin_{0-20} \times 0,9$$

donde,

ppm_Nmin_{0-40} : disponibilidad de N-mineral en el suelo a 0-40 cm de profundidad (ppm o mg kg⁻¹).

ppm_Nmin_{0-20} : disponibilidad de N-mineral en el suelo a 0-20 cm de profundidad (ppm o mg kg⁻¹).

Por otro lado, la densidad aparente del suelo (**Dap**) puede estimarse a través del contenido de materia orgánica en suelos volcánicos, tal como ha sido propuesto por Pinochet (2005):

$$Dap = 1 / [0,563 + (0,055 \times MOS)]$$

donde,

Dap: densidad aparente del suelo (g cm⁻³).

MOS: contenido de materia orgánica del suelo (% ó kg 100 kg⁻¹).

Por su parte, el factor del suministro de N (**fSN**) contabiliza el N mineralizado desde la fracción lábil del N orgánico del suelo (“N orgánico potencialmente mineralizable”) y depende del historial de ingreso de residuos orgánicos al suelo. De esta forma, el factor del suministro de N en suelos volcánicos cultivados con arándanos puede estimarse a partir de la cantidad promedio de materia seca ingresada al suelo en los residuos de poda (hojas y brotes) u otros residuos orgánicos durante los últimos 6 años (Cuadro 4.1).

Cuadro 4.1. Estimación del factor de suministro de N desde el N “potencialmente mineralizable” para el cultivo del arándano en suelos volcánicos del sur de Chile, de acuerdo a la cantidad de residuos orgánicos ingresados en los **últimos 6 años**.

Residuos Ingresados* (kg MS ha ⁻¹)	Factor de suministro de N (fSN) (kg N ha ⁻¹ temporada ⁻¹)
2.000	21
4.000	42
6.000	64
8.000	85

*Ver cuadro de residuos de poda (Sección 3.3.2, Cuadro 3.7)

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

La estimación del factor de suministro de N considera la cantidad promedio de residuos (MS ha⁻¹) ingresados al suelo en los **últimos 6 años**, ya que es la que constituye la mayor parte del N orgánico y, por ende, es responsable de la mineralización del N del suelo (Rodríguez et al., 2001; Pinochet, 2005). Además, considera solo una parte del N mineralizado desde el N orgánico del suelo, dado que el período de mineralización que coincide con el crecimiento activo de los arándanos (“sincronía”), corresponde solo al período de primavera-verano.

En esta aproximación, no se consideraron las raíces del cultivo como ingreso de residuos al suelo, ya que se asumieron en una condición de “estado estacionario” entre dos temporadas consecutivas de crecimiento; supuesto que es usual en las estimaciones de N-mineral proveniente del N “potencialmente mineralizable” (Rodríguez et al., 2001).

La ecuación de suministro de N debe considerar también, un factor que contabilice la habilidad de las raíces de las plantas de arándano para recuperar el N-mineral presente en el suelo durante la temporada de cultivo ($fAbs_N$). De acuerdo a los ensayos realizados en suelos volcánicos, este factor sería de $3,5 \text{ dm kg}^{-1}$, y considera: (a) la recuperación del N-mineral en el suelo hasta 40 cm de profundidad, que es la profundidad en la que se ubica la mayor parte del sistema radical del arándano (Bryla, 2007) y que fue ratificada en este proyecto; y (b) una estimación de las pérdidas de N más probables durante la temporada de crecimiento del arándano.

4.4 Eficiencia de la fertilización nitrogenada

La eficiencia de la fertilización nitrogenada considera la posibilidad de recuperación por el cultivo, del N proveniente de los fertilizantes aplicados. Los fertilizantes nitrogenados usuales que se venden Chile, incluida la urea (fertilizante orgánico artificial), se caracterizan por ser de entrega inmediata en formas minerales de N. Esto significa que el amonio y/o nitrato contenido en los fertilizantes, estarán disponibles para su absorción por las plantas en menos de 7 días. La excepción la constituyen los fertilizantes orgánicos naturales que requieren de condiciones de humedad y temperatura adecuadas para que se mineralice, por lo que el N en formas minerales no estará disponible inmediatamente después de su aplicación al suelo. En general, se considera que entre 25% a 70% del N “potencialmente mineralizable” de este tipo de fertilizantes, es entregado en formas minerales durante la temporada de cultivo. Por lo tanto, en el caso de los fertilizantes minerales y de la urea, la cantidad de N aplicado se encontrará completamente disponible durante la temporada del cultivo, por lo que la eficiencia de la fertilización variará principalmente debido a la magnitud de las pérdidas en el ciclo interno del N en el suelo y las posibilidad de control de esas pérdidas, de acuerdo al nivel tecnológico del sistema productivo. En general, en este tipo de fertilizantes se acepta que la eficiencia de recuperación de N por los cultivos varía entre 45% y 65% para especies que se cultivan en primavera-verano (Cuadro 4.2)

Se estima que luego de la aplicación del fertilizante N se producen **pérdidas inevitables**, incluso en sistemas productivos con niveles tecnológicos muy altos. Se producen pérdidas de entre 20% a 25% del N en inmovilización, es decir, por el N absorbido por los microorganismos del suelo y por el N absorbido por el cultivo e inmovilizado en las raíces. Además, se pierde entre 5% a 15% del N del fertilizante a través del proceso de desnitrificación, que ocurre en el suelo en micrositios con condiciones anaeróbicas debido a la respiración microbial y de raíces y a la saturación de poros de drenaje, luego de una lluvia o un riego.

Cuadro 4.2. Eficiencia de la fertilización N para huertos de arándanos en el sur de Chile, de acuerdo al nivel tecnológico para el control de las pérdidas de N del fertilizante.

Nivel tecnológico del huerto	Eficiencia de la fertilización N (kg kg ⁻¹)
Muy Alto (ferti-irrigación)	0,65
Alto (aplicaciones incorporadas)	0,60
Medio (aplicación normal)	0,55
Bajo (aplicación con riesgos de pérdidas)	0,50
Muy Bajo (sin control de pérdidas)	0,45

Fuente: Adaptado de Rodríguez et al (2001)

Como se observa en el Cuadro 4.2, el nivel tecnológico del huerto es determinante en la eficiencia de fertilización nitrogenada debido a las posibilidades de disminuir las pérdidas de N-mineral que están sujetas a manejo. Las pérdidas que pueden ser manejadas son: (a) la lixiviación de N, que corresponde al arrastre de N en el agua que percola en el perfil de suelo, principalmente en la forma de nitratos y, en menor medida, como amonio; y (b) la volatilización de amoniaco desde fuentes fertilizantes amoniacales, debido a la disociación del amonio bajo condiciones de suelo alcalinas y de baja humedad. Ambos procesos, pueden ser minimizados con una adecuada tecnología de aplicación (fuente fertilizante, forma y época de aplicación; Fig. 4.3), por lo cual se ha ligado la eficiencia de la fertilización nitrogenada al nivel tecnológico de los agricultores.



Figura 4.3. Parcialización de la fertilización N de acuerdo a las etapas fenológicas de huertos de arándano del sur de Chile. (A) Primera aplicación de N; (B) segunda aplicación de N; y (C) tercera aplicación de N.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

4.5 Ejemplo de cálculo de la dosis de fertilización nitrogenada

A continuación se presenta un ejemplo de cálculo de la dosis de fertilización nitrogenada para un cuartel de 3,5 hectáreas de arándano cv 'Elliot' de 6 años de edad, con una densidad de plantación de 3.333 plantas ha⁻¹, sobre un suelo trumao. El manejo de residuos de poda del huerto incluye el retiro parcial de estos residuos, por lo que en los últimos cinco años se han ingresado al suelo, un promedio de 2000 kg MS ha⁻¹.

EJEMPLO 1

a) Cálculo de la Demanda de N

Rendimiento a alcanzar= 15 t ha⁻¹ = 15.000 kg ha⁻¹ = 4,5 kg planta⁻¹

Factor de demanda de N= 7,8 g N kg⁻¹ fruta fresca (Sección 4.2)

$$Dem_N = (Rend_Alcanzar \times fDem_N) / fConv$$

$$Dem_N = (15.000 \times 7,8) / 1.000$$

$$Dem_N = 117 \text{ kg N ha}^{-1}$$

b) Cálculo del Suministro de N del suelo

N-mineral a 0-40 cm profundidad= 15 ppm (Análisis de suelo)

Densidad aparente= 0,65 g cm⁻³ (Análisis de suelo)

Ingreso promedio de residuos= 2.000 kg MS ha⁻¹ (Registros huerto)

Factor suministro de N del suelo= 21 kg N ha⁻¹ (Cuadro 4.1)

$$Sum_N = (ppm_Nmin_{0-40} \times Dap \times fAbs_N) + fSN$$

$$Sum_N = (15 \times 0,65 \times 3,5) + 21$$

$$Sum_N = 55 \text{ kg N ha}^{-1}$$

c) Estimación de la Eficiencia de la Fertilización N

La fertilización N será realizada incorporada bajo el mulch de protección en 3 parcialidades.

Eficiencia fertilización N = 0,60 kg kg⁻¹ (Cuadro 4.2)

d) Cálculo de la Dosis de Fertilización N

$$Dosis_N = (Dem_N - Sum_N) / Efic_FN$$

$$Dosis_N = (117 - 55) / 0,60$$

$$Dosis_N = 103 \text{ kg N ha}^{-1}$$

$$Dosis_N = 103 \text{ kg N ha}^{-1} \times 3,5 \text{ ha}$$

$$Dosis_N = 361 \text{ kg N para el cuartel completo}$$

De esta forma, para las condiciones de manejo sitio específicas de este cuartel, la dosis de N que satisface un rendimiento de 15 t ha⁻¹ sería de 103 kg N ha⁻¹.

Las dosis de N serán variables dependiendo de cada condición particular (dosis sitio-específicas) y pueden ir desde 0 a 100 kg N ha⁻¹ para rendimientos de 10 a 14 t ha⁻¹; y entre 0 a 225 kg N ha⁻¹ para rendimientos de 18 a 24 t ha⁻¹. Estos rangos de variación en arándanos son amplios debido a que dependen, principalmente, de la productividad a alcanzar y del ingreso histórico de residuos de hojas y madera de poda al suelo. En la medida que el rendimiento a alcanzar sea mayor, y el ingreso histórico de residuos haya sido bajo, las dosis de N serán superiores.

Las dosis de N calculadas con el modelo propuesto en este manual se ajustan razonablemente a las dosis recomendadas en USA, de acuerdo a los ensayos de calibración que han sido realizados en los distintos estados de ese país y considerando las productividades alcanzadas en sus huertos. Como referencia, las dosis de fertilización N para arándanos en plena producción en el sur de Chile, debieran estar en el rango de 60 a 150 kg N ha⁻¹ para rendimientos de 14 a 18 t ha⁻¹; rendimientos que deben ser nuestro principal objetivo de productividad en el futuro próximo en los huertos del sur de Chile.

Literatura consultada

- Bryla, D.R., Strick, B.C. 2007. Effects of cultivar and plant spacing on the seasonal water requirements of highbush blueberry. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 132: 270-277.
- Pinochet, D. 2005. El sistema de recomendación de fertilización de los cultivos extensivos en Chile. En: Simposio Fertilidad 2005. Nutrición, Producción y Ambiente. García, F., Micucci, G. (Eds.). INPOFOS / fertilizar. Rosario, Argentina. pp 35-39.
- Rodríguez, J., Pinochet, D., Matus, F. 2001. Fertilización de los Cultivos. LOM Ediciones. Santiago, Chile.
- Sierra, C., Rodríguez, J. 1986. Efecto del historial de manejo en la mineralización de nitrógeno. *Ciencia e Investigación Agraria* 13: 229-228.
- Silva, H., Rodríguez, J. 1995. Fertilización de Plantaciones Frutales. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile.

CAPITULO 5

ACIDEZ DEL SUELO Y TOXICIDAD POR ALUMINIO

5.1 Antecedentes generales

La acidificación de los suelos es un proceso natural que ocurre en sitios donde la pluviometría excede a la evapotranspiración, produciendo un continuo lavado de bases. En Chile, los suelos ácidos aparecen en la región del Maule y aumentan en frecuencia y extensión hacia el sur del país en la medida que la pluviometría se incrementa, alcanzando su máxima expresión en la región de los Ríos y de los Lagos.

La acidificación natural del suelo puede ser acelerada por fuentes adicionales de acidez, tales como la mineralización de la materia orgánica y la nitrificación del N-amoniacal. Ambos procesos liberan iones hidrógeno (H^+), disminuyendo el pH del suelo. Particularmente, la aplicación de azufre elemental y el uso intensivo de fertilizantes amoniacales y urea, que corresponden a prácticas comúnmente utilizadas en el cultivo del arándano, aceleran la acidificación natural de los suelos.

El Aluminio (Al) es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre y en los suelos está presente como aluminosilicatos y óxidos e hidróxidos insolubles. A medida que el pH de suelo disminuye, el Al es solubilizado desde los minerales a la solución, aumentando su disponibilidad para las plantas. Este elemento es altamente tóxico para la vida vegetal, en mayor o menor grado, según la especie e incluso variedad. En arándano alto, por ejemplo, la sensibilidad a toxicidad por Al es dependiente de la variedad. 'Legacy' y 'Bluegold' son cultivares muy sensibles al estrés por Al; mientras que 'Brigitta' es un cultivar más resistente. La fitotoxicidad por Al ha sido ampliamente reconocida como uno de los principales factores que limita el crecimiento de las plantas en suelos ácidos, particularmente a $pH-H_2O < 5,5$. Sin embargo, el conocimiento de los efectos de la toxicidad por Al y mecanismos de resistencia es muy limitado en plantas leñosas y, más aún, en frutales.

En condiciones naturales, el arándano crece en suelos ácidos, por lo que se ha asumido que debiera ser relativamente tolerante a Al. Sin embargo, las poblaciones nativas del género *Vaccinium* se encuentran mayormente en suelos con niveles bajos de Al y/o niveles altos de materia orgánica que favorecen la formación de complejos no tóxicos con Al. Cuando los arándanos son cultivados en suelos minerales, la acidificación del suelo previo a la plantación, produce un aumento de la disponibilidad de Al y la magnitud de este aumento, es mayor en suelos de origen volcánico.

Por lo tanto, en suelos de origen volcánico, como los utilizados en el cultivo del arándano en el sur de Chile, la acidificación del suelo ($\text{pH-H}_2\text{O} < 5,5$) significa un alto riesgo de toxicidad por Al.

El ápice de las raíces es el sitio primario de percepción y acumulación de Al, y por ende, la inhibición del crecimiento radical es la manifestación fisiológica más evidente de la exposición a exceso de Al en la solución del suelo. Esto, a su vez, es resultado de la interferencia en la división y elongación de las células meristemáticas presentes en el ápice de las raíces. Este daño es también asociado a la rigidización de la pared celular debido a la unión del Al a esta estructura, a la alteración de las membranas celulares debido a estrés oxidativo, a desórdenes enzimáticos, a la disturbación de la síntesis de ADN, entre otros efectos fisiológicos.

El efecto del Al sobre el crecimiento radical se produce en el corto plazo. En plantas sensibles, la inhibición de la elongación de las raíces se ha detectado dentro de 30 minutos a 2 horas desde su exposición al elemento. En plántulas de arándano alto, se ha observado que la elongación de raíces fue completamente inhibida por Al luego de 48 horas de exposición. Adicionalmente, se han reportado un aumento en la tasa de mortalidad de las raíces, alteraciones en la arquitectura radical, reducción de la producción de raíces laterales y de pelos radicales y deformación en el ápice.

La interferencia del Al en el crecimiento y desarrollo radical se traduce en la disminución de la absorción, transporte y uso de nutrientes y agua, generando estrés hídrico y deficiencias nutricionales en la parte aérea de las plantas, y por lo tanto, una disminución de la productividad de los cultivos.

En órganos aéreos de las plantas, la información de los efectos tóxicos del Al es restringida, aunque está bien establecido que se manifiestan en forma posterior a los efectos en el crecimiento radical. En plantas de arándano alto se ha observado una disminución de la biomasa de la parte aérea y radical. También se ha registrado una translocación efectiva de este elemento desde las raíces hacia los órganos aéreos, expresada en un aumento de la concentración de Al en las hojas en la medida que aumenta el nivel de este elemento en el ambiente radical, tanto en variedades sensibles ('Legacy') como resistentes ('Brigitta'). A su vez, la acumulación de Al en las hojas de arándano induce una disminución del contenido de clorofila total y una menor funcionalidad del aparato fotosintético, los que contribuyen a la disminución de la productividad del cultivo.

5.2 Acidez del suelo y disponibilidad de Aluminio para las plantas

La toxicidad por Al no solo depende de la concentración de Al en la solución del suelo, sino que también de las formas químicas de Al que determinan su biodisponibilidad, las que están estrechamente relacionadas al pH del suelo. La forma octaedral hexahidratada, más comúnmente referida como Al^{+3} , es considerada la más fitotóxica y es la especie dominante a $\text{pH} < 5$ (Fig. 5.1).

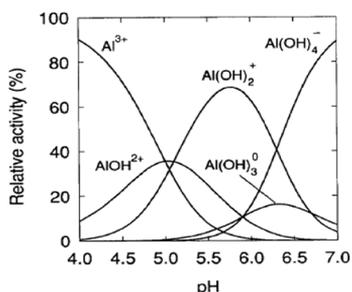


Figura 5.1. Actividad relativa de las formas químicas de Al según el pH de la solución.

Fuente: Kinraid (1991)

En suelos ácidos, la disponibilidad de Al^{+3} es medida en el análisis de suelo como Al intercambiable, que corresponde al reservorio con el cual mayoritariamente se equilibra el Al en solución; y según lo descrito anteriormente, varía de acuerdo al pH del mismo (Fig. 5.2). Por ende, en suelos volcánicos, el análisis de pH, además de medir la acidez activa del mismo, refleja el contenido de Al intercambiable. Como referencia, se ha definido $0,1 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$ como nivel crítico en los suelos para especies vegetales sensibles.

El porcentaje de saturación de Al es otro análisis de suelo que permite estimar la probabilidad de toxicidad por Al. Este índice representa la proporción de los sitios de intercambio catiónico de los minerales del suelo que son ocupados por Al^{+3} , en reemplazo de los cationes calcio (Ca^{+2}) y magnesio (Mg^{+2}). En este contexto, el Ministerio de Agricultura de Chile ha fijado para las regiones con predominio de suelos volcánicos, un límite de 5% de saturación de aluminio, sobre el cual hay una alta probabilidad de toxicidad por Al en los cultivos.

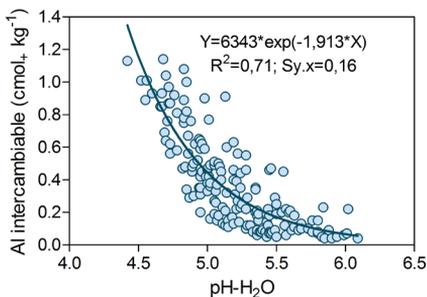


Figura 5.2. Relación entre el pH y la disponibilidad Al en suelos volcánicos del sur de Chile cultivados con arándano alto (regiones de los Ríos y los Lagos). Valores medidos a 20 cm de profundidad durante las temporadas 2009-10 y 2010-11. N=176.

Fuente: Proyecto FIA PYT-2009-0080

El 53% de las Series de suelos de Andisoles en la región de la Araucanía tiene $\text{pH-H}_2\text{O} < 5,8$ y el 34% una saturación de Al $> 5\%$ en los primeros 20 cm. Mientras que en las regiones de los Ríos y los Lagos, el 84% de los Andisoles tiene $\text{pH-H}_2\text{O} < 5,8$ y el 62% una saturación de Al $> 5\%$ en los primeros 20 cm de suelo. Los suelos cultivados con arándano han sufrido una acidificación aún mayor debido a la aplicación de azufre elemental pre-plantación y al uso intensivo de fertilizantes amoniacales y urea. Estas prácticas buscan mantener el pH del suelo entre 4,5 y 5,2, según lo recomendado por guías técnicas desarrolladas en USA. Sin embargo, en suelos volcánicos, ese rango de pH significa un alto riesgo de toxicidad por Al^{+3} , de acuerdo a la estrecha relación existente entre el pH del suelo y la disponibilidad de Al^{+3} medida como Al intercambiable (Fig. 5.2); y se ha observado que en suelos volcánicos con $\text{pH} < 5,5$, el nivel de Al intercambiable aumenta en forma acelerada, superando ampliamente el nivel crítico de $0,1 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$ definido para especies sensibles.

5.3 Nivel crítico en el suelo y estándar foliar de Aluminio para arándanos cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile

El análisis de los datos derivados del monitoreo durante dos temporadas (2009-10 y 2010-11) de 11 ensayos establecidos en cinco huertos de arándanos cultivados sobre suelos volcánicos entre las regiones de los Lagos y los Ríos, permitió establecer con claridad el nivel crítico de Al para las variedades de arándano 'Brigitta' y 'Elliot'. Esto significa, el nivel de Al intercambiable en el suelo que permite alcanzar 95% del rendimiento máximo que este tipo de agroecosistemas puede producir. Este nivel crítico se definió en $0,20 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$ de Al intercambiable, en base a la relación entre el nivel de Al intercambiable en el suelo y el rendimiento relativo; es decir, el rendimiento de fruta en sitios con diferentes niveles de disponibilidad de Al referente al rendimiento máximo producido en cada sitio, con niveles no limitantes de Al (Fig. 5.3).

Lo anterior significa que la expresión del potencial productivo en arándano solo será posible en agroecosistemas del sur de Chile, en suelos volcánicos con niveles de Al disponible menores a $0,20 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$ (Fig. 5.3). Además, como el nivel de Al disponible en el suelo está estrechamente relacionado al pH del mismo (Fig. 5.2), el $\text{pH-H}_2\text{O}$ del suelo no debiera ser menor a 5,4 para que el Al disponible sea cercano al nivel crítico definido en este estudio. En caso contrario, el nivel de Al disponible aumenta fuertemente en el suelo y, consecuentemente, los rendimientos se verán disminuidos. Esto contrasta con la recomendación general en USA de mantener el pH del suelo entre 4,5 y 5,2, poniendo de manifiesto las características químicas específicas de los suelos volcánicos y la necesidad de validar las tecnologías desarrolladas en condiciones edafoclimáticas diferentes a las locales.

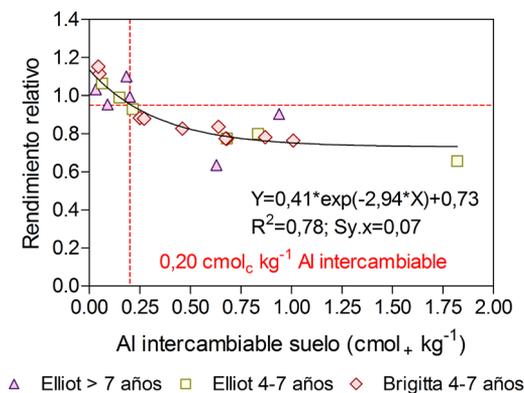


Figura 5.3. Relación entre la disponibilidad de Al en el suelo y el rendimiento relativo de arándanos cultivados en suelos volcánicos del sur de Chile durante las temporadas 2009-10 y 2010-11. Valores promedio de 3 repeticiones. Línea negra corresponde a línea de regresión.

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Por su parte, el proyecto FIA PYT 2009-0080 definió como estándar foliar para Al, concentraciones $< 60 \text{ mg kg}^{-1}$ (ppm), específicamente para muestreos realizados a inicios de temporada (mediados noviembre - mediados diciembre). La fecha de muestreo foliar se determinó evaluando, durante dos temporadas, la variación de la concentración foliar de Al en suelos con bajos ($< 0,09 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$) y altos niveles ($> 0,68 \text{ cmol}_+ \text{ kg}^{-1}$) de Al disponible medido en la forma de Al intercambiable (Fig. 5.4).

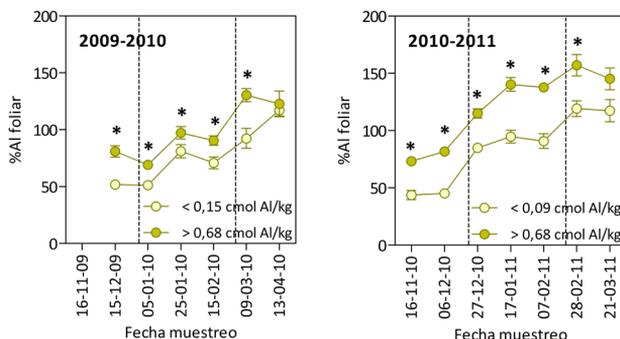


Figura 5.4. Variación de la concentración foliar (%) de Al en muestras foliares de arándanos cultivados en el sur de Chile durante las temporadas 2009-10 y 2010-11. Valores promedio para variedades 'Elliot' y 'Brigitta'.

Las líneas punteadas paralelas indican el período de tiempo actualmente utilizado para el muestreo foliar en el sur de Chile. El asterico indica diferencias significativas entre sitios dentro de una misma fecha de muestreo (Test Tukey; $p \leq 0,05$).

Fuente: Proyecto FIA PYT 2009-0080

Tal como se observa en la Fig. 5.4, el análisis foliar fue sensible en detectar diferencias significativas en la concentración de Al foliar entre suelos con altos y bajos niveles de Al disponible, en la mayoría de los muestreos de la temporada. Sin embargo, estas diferencias desaparecieron al final de la temporada (marzo-abril), por lo que la recomendación práctica es hacer el muestreo foliar para Al a principios de la temporada, de modo que el muestreo sea útil para el análisis de varios elementos a la vez (N y S).

5.4 Corrección de la acidez del suelo y toxicidad por Aluminio

Una de las opciones más usadas para corregir la toxicidad por Al consiste en la neutralización de la acidez del suelo a través del encalado. Otra opción es usar especies o variedades resistentes a Al. Sin embargo, el encalado del suelo es la práctica más utilizada y corresponde a aplicación de materiales de reacción alcalina (usualmente óxidos, hidróxidos y carbonatos de Ca y/o Mg) con el objetivo de aumentar el pH del suelo, y consecuentemente, precipitar al aluminio en un compuesto insoluble, eliminando su efecto tóxico para las plantas. Por lo tanto, esta práctica permite disminuir el nivel de Al disponible del suelo, aunque su efectividad está limitada a la capa superficial del suelo.

La dosis de encalado debe ser diseñada cuidadosamente en cada caso, según el tipo de suelo y la tolerancia a la toxicidad por Al del cultivo, ya que la aplicación de dosis de encalado excesivas (sobreenalado) puede provocar limitaciones a la producción vegetal, debido a la generación de deficiencias, particularmente de Magnesio (Mg), Zinc (Zn), Boro (B) y Hierro (Fe).

La dosis de encalado a aplicar dependerá de la diferencia entre el pH inicial del suelo y el pH a alcanzar, y la capacidad tampón del suelo:

$$\text{Dosis encalado} = (\text{pH alcanzar} - \text{pH inicial}) / \text{CT}_{\text{pH}}$$

donde,

Dosis encalado: dosis de encalado expresada en t ha^{-1} de carbonato de calcio puro (CaCO_3) en los primeros 20 cm de suelo.

pH inicial: pH del suelo medido en agua en el análisis de suelo.

pH a alcanzar: pH del suelo a alcanzar con el encalado.

CT_{pH}: capacidad tampón de pH del suelo (unidades pH/ t CaCO_3).

El **pH a alcanzar** se define en un valor en que la disponibilidad de Al no limita la productividad del cultivo. Para suelos volcánicos y para arándanos, el pH a alcanzar es 5,4, aunque se recomienda aumentar ese valor en al menos 0,2 unidades de pH (ej. pH 5,6) para aplazar el momento de la aplicación del encalado de mantención.

La capacidad tampón de pH (**CT_{pH}**) corresponde a la resistencia del suelo a cambiar su pH. En suelos “trumaos”, el valor de este parámetro es mayor a la de otros suelos del país, siendo su valor 0,12 unidades pH/ t CaCO₃, lo que significa que la aplicación de 1 t CaCO₃ (puro) en los primeros 20 cm de suelo producirá un aumento de pH de 0,12 unidades de pH (por ej., desde pH 5,20 a 5,32). En suelos “rojo arcillosos”, la capacidad tampón de pH es de 0,15 unidades pH/ t CaCO₃. La incorporación de la enmienda calcárea a esta profundidad (20 cm) solo es posible previo al establecimiento del huerto. En el caso de huertos establecidos, es importante indicar que las aplicaciones en cobertera neutralizarán la acidez solo en los primeros centímetros de suelo, debido a la baja movilidad de Ca en el suelo.

La dosis de encalado calculada según la ecuación descrita, debiera corregirse según el valor agronómico de la fuente de enmienda calcárea a aplicar, el que refleja la composición, valor neutralizante, finura, contenido de humedad e inertes de la fuente. Después del encalado, el pH del suelo debiera monitorearse mediante análisis de suelo cada 3 a 4 años para definir el momento y cantidad de un “encalado de mantención”, cuyo objetivo es mantener el pH y la disponibilidad de Al en el rango óptimo para los arándanos.

Literatura consultada

- Bakker, M.R., Kerisit, R., Verbist, K., Nys, C. 1999. Effects of liming on rhizosphere chemistry and growth of fine roots and of shoots of sessile oak (*Quercus petraea*). *Plant and Soil* 217: 243–255.
- Barceló, J., Poschenrieder, C. 2002. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. *Environmental and Experimental Botany* 48: 75-92.
- Ciamporová, M. 2002. Morphological and structural responses of plant roots to aluminium at organ, tissue, and cellular levels. *Biologia Plantarum* 45: 161-171.
- Havlin, J., Beaton, J., Tisdale, S., Nelson, W. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to nutrient management*. Pearson Prentice Hall. New Jersey, USA.
- Horst, W., Wang, Y., Eticha, D. 2010. The role of the root apoplast in aluminium-induced inhibition of root elongation and in aluminium resistance of plants: a review. *Annals of Botany* 106: 185-197.
- Inostroza-Blancheteau, C., Reyes-Díaz, M., Aquea, F., Nunes-Nesi, A., Alberdi, M., Arce-Johnson, P. 2011. Biochemical and molecular changes in response to aluminium-stress in highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry* 49: 1005-1012.
- Inostroza-Blancheteau, C., Rengel, Z., Alberdi, M., Mora, M., Aquea, F., Arce-Johnson, P., Reyes-Díaz, M. 2012. Molecular and physiological strategies to increase aluminum resistance in plants. *Molecular Biology Reports* 39: 2069-2079.
- Jones, D.L., Blancaflor, E.B., Kochian, L.V., Gilroy, S. 2006. Spatial coordination of aluminium uptake, production of reactive oxygen species, callose production and wall rigidification in maize roots. *Plant, Cell and Environment* 29: 1309-1318.
- Kinraide, T.B. 1991. Identity of the rhizotoxic aluminium species. *Plant and Soil* 134: 167-178.
- Kochian, L.V. 1995. Cellular mechanisms of aluminum toxicity and resistance in plants. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 46: 237-260.
- Kochian, L.V., Hoekenga, O.A., Piñeros, M.A. 2004. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annual Review of Plant Biology* 55: 459-493.
- Kochian, L.V., Piñeros, M., Hoekenga, O.A. 2005. The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminum resistance and toxicity. *Plant and Soil* 274: 175-195.
- Matsumoto, H. 2000. Cell biology of aluminum toxicity and tolerance in higher plants. *International Review of Cytology* 200: 1-46.
- Reyes-Díaz, M., Alberdi, M., Mora, M. 2009. Short-term Aluminum Stress Differentially Affects the Photochemical Efficiency of Photosystem II in Highbush Blueberry Genotypes. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 134: 14-21.
- Reyes-Díaz, M., Inostroza-Blancheteau, C., Millaleo, R., Cruces, E., Wulff-Zottele, C., Alberdi, M., Mora, M. 2010. Long-term Aluminum Exposure Effects on Physiological and Biochemical Features of Highbush Blueberry Cultivars. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 135: 212-222.
- Rodríguez, J., Pinochet, D., Matus, F. 2001. *Fertilización de los Cultivos*. LOM Ediciones. Santiago, Chile.
- Ryan, P.R., Ditomaso, J.M., Kochian, L.V. 1993. Aluminium toxicity in roots: an investigation of spatial sensitivity and the role of the root cap. *Journal of Experimental Botany* 44: 437-446.

- Sadzawka, A. 2006. Propiedades físico-químicas de los suelos. I: Reacción (pH), acidez y alcalinidad. En: Avances en el conocimiento de los suelos de Chile. Luzio, W., Casanova, M. (Eds.). Santiago, Chile. pp: 91-127.
- Yamamoto, Y., Kobayashi, Y., Devi, S.R., Rikiishi, S., Matsumoto, H. 2003. Oxidative stress triggered by aluminum in plant roots. *Plant and Soil* 255: 239–243.
- Yang, W.Q., Goulart, B.L. 1997. Aluminum and phosphorus interactions in mycorrhizal and nonmycorrhizal highbush blueberry plantlets. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 122: 24-30.

